



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS
CARRERA DE INGENIERÍA EN MECATRÓNICA

Sistema de Monitoreo Remoto de Oscilaciones en Estructuras Sometidas a Carga Dinámica Utilizando Tecnología IoT

Trabajo de grado previo a la obtención del título de
Ingeniero en Mecatrónica

Línea de investigación: Producción industrial y tecnología sostenible

Autor:

Alexander Valentin Gordillo Rojas

Director:

Dr. Carlos Xavier Rosero Chandi.

Asesor:

Prof. Marco Antonio Ciaccia Sortino

Ibarra, Ecuador 2025



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE
BIBLIOTECA UNIVERSITARIA

1. IDENTIFICACIÓN DE LA OBRA

En cumplimiento del Art. 144 de la Ley de Educación Superior, hago la entrega del presente trabajo a la Universidad Técnica del Norte para que sea publicado en el Repositorio Digital Institucional, para lo cual pongo a disposición la siguiente información:

DATOS DE CONTACTO			
CÉDULA DE IDENTIDAD:	1004178412		
APELLIDOS Y NOMBRES:	Gordillo Rojas Alexander Valentin		
DIRECCIÓN:	Urcuquí, Pablo Arenas, La Merced, Calle Sucre, Vía Cahuasquí.		
EMAIL:	avgordillor@utn.edu.ec/vgordillorojas@gmail.com		
TELÉFONO FIJO:	(06)2 683 163	TELÉFONO MÓVIL:	0968957968

DATOS DE LA OBRA	
TÍTULO:	Sistema de Monitoreo Remoto de Oscilaciones en Estructuras Sometidas a Carga Dinámica Utilizando Tecnología IoT”
AUTOR (ES):	Alexander Valentin Gordillo Rojas
FECHA: DD/MM/AAAA	17/02/2025
PROGRAMA:	<input checked="" type="checkbox"/> GRADO <input type="checkbox"/> POSGRADO
TITULO POR EL QUE OPTA:	Ingeniero en Mecatrónica
DIRECTOR/ ASESOR :	Dr. Carlos Xavier Rosero Chandi Dr. Marco Antonio Ciaccia Sortino

2. CONSTANCIAS

El autor (es) manifiesta (n) que la obra objeto de la presente autorización es original y se la desarrolló, sin violar derechos de autor de terceros, por lo tanto, la obra es original y que es (son) el (los) titular (es) de los derechos patrimoniales, por lo que asume (n) la responsabilidad sobre el contenido de la misma y saldrá (n) en defensa de la Universidad en caso de reclamación por parte de terceros.

Ibarra, a los 17 días del mes de febrero de 2025

EL AUTÓR:

Firma: 

Nombre: Alexander Valentin Gordillo Rojas



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE
FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICAS
CARRERA DE INGENIERÍA EN MECATRÓNICA

**CERTIFICACIÓN DEL DIRECTOR DEL TRABAJO DE
INTEGRACIÓN CURRICULAR**

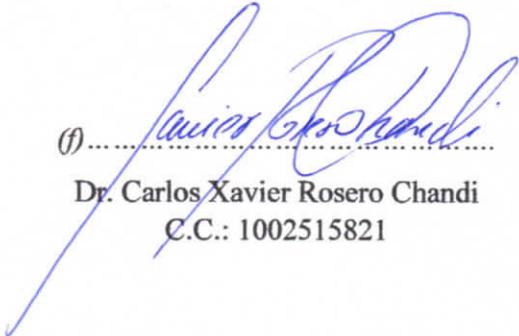
Ibarra, 17 de febrero de 2025

Dr. Carlos Xavier Rosero Chandi

DIRECTOR DEL TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR

CERTIFICA:

Haber revisado el presente informe final del Trabajo de Integración Curricular, el mismo que se ajusta a las normas vigentes de la Universidad Técnica del Norte; en consecuencia, autorizo su presentación para los fines legales pertinentes.

(f) 

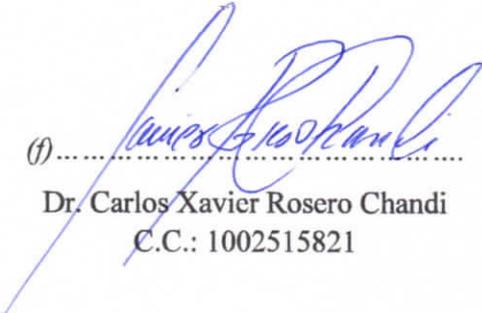
Dr. Carlos Xavier Rosero Chandi
C.C.: 1002515821



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE
FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICAS
CARRERA DE INGENIERÍA EN MECATRÓNICA

APROBACIÓN DEL COMITÉ CALIFICADOR

El Comité Calificado del trabajo de Integración Curricular “SISTEMA DE MONITOREO REMOTO DE OSCILACIONES EN ESTRUCTURAS SOMETIDAS A CARGA DINÁMICA UTILIZANDO TECNOLOGÍA IOT” elaborado por ALEXANDER VALENTIN GORDILLO ROJAS , previo a la obtención del título de INGENIERO EN MECATRÓNICA, aprueba el presente informe de investigación en nombre de la Universidad Técnica del Norte:

(f).....

Dr. Carlos Xavier Rosero Chandi
C.C.: 1002515821

(f).....

Prof. Marco Antonio Ciaccia Sortino
C.C.: 1756778252

Dedicatorias

Este trabajo va dedicado a mi familia, quienes en momentos de frustración supieron entender y apoyarme de manera incondicional, con fe ferviente en el trabajo que estaba realizando, un simple tú puedes hizo la diferencia en bastantes ocasiones, quiero hacer una mención muy especial a mi madre quien con sus palabras y gestos hizo este proceso más agradable y quedara siempre en mi corazón la frase “aunque no entienda lo que haces, yo te apoyo”, demostrándome el inconmensurable amor que ella representa.

Agradecimientos

Quiero agradecer a la Cruz Roja Ecuatoriana - Imbabura, quienes gentilmente dotaron del espacio necesario para llevar a cabo la implementación del servidor puente y la conexión del Gateway, en especialmente a Héctor, quien fue el encargado de toda la gestión, brindando su tiempo y esfuerzo para el correcto desarrollo.

Resumen

Las estructuras de los puentes están sometidas a desgaste progresivo. Esta condición es causada por cargas dinámicas y vibraciones presentes, pudiendo originar fallas catastróficas. Esta situación plantea un desafío significativo, ya que se compromete su integridad estructural y la seguridad de quienes circulan a través de la estructura. Dado lo anterior, se presenta un trabajo con el objetivo de desarrollar un sistema de monitoreo basado en tecnología de Internet de las Cosas para registrar y analizar las oscilaciones presentes en dichas estructuras. La metodología incluye la caracterización de las oscilaciones relacionadas con posibles fallas estructurales, el diseño e implementación de un sistema de comunicación remota utilizando la tecnología LoRaWAN y la instalación de dispositivos en los puentes para recopilar datos in situ. Los sensores implementados permiten registrar métricas clave como el número de picos, la amplitud máxima y los valores de raíz cuadrática media, utilizando redes de largo alcance y bajo consumo para garantizar la eficiencia. Los datos recolectados son procesados en plataformas digitales, donde se generan visualizaciones obtenidas en el menor tiempo posible, lo que facilita la toma de decisiones informadas. Los resultados destacan la capacidad del sistema para detectar fallas de manera oportuna y prevenir problemas críticos, mientras que su diseño escalable y adaptable lo posiciona como una solución viable para mejorar el mantenimiento de infraestructuras y optimizar los procesos de detección y prevención de fallas.

Palabras clave: Oscilaciones, monitoreo, Internet de las Cosas (IoT), LoRaWAN, LPWAN, LoRa, TTL, caracterización, carga dinámica.

Abstract

Bridge structures are subjected to progressive wear. This condition is caused by dynamic loads and vibrations, which can lead to catastrophic failures. This situation presents a significant challenge, as it compromises structural integrity and the safety of those crossing the structure. Given this, a study is presented with the objective of developing a monitoring system based on Internet of Things (IoT) technology to record and analyze the oscillations present in such structures. The methodology includes the characterization of oscillations related to potential structural failures, the design and implementation of a remote communication system using LoRaWAN technology, and the installation of devices on bridges to collect on-site data. The implemented sensors allow for the recording of key metrics such as the number of peaks, maximum amplitude, and root mean square values, using long-range and low-power networks to ensure efficiency. The collected data is processed on digital platforms, where visualizations are generated in the shortest possible time, facilitating informed decision-making. The results highlight the system's ability to detect failures in a timely manner and prevent critical issues, while its scalable and adaptable design positions it as a viable solution for improving infrastructure maintenance and optimizing failure detection and prevention processes.

Keywords: Oscillations, monitoring, Internet of Things (IoT), LoRaWAN, LPWAN, LoRa, TTL, characterization, dynamic load.

Índice de Contenidos

IDENTIFICACIÓN DE LA OBRA	II
CONSTANCIAS	III
CERTIFICACIÓN DEL DIRECTOR DEL TRABAJO DE GRADO	IV
APROBACIÓN DEL COMITÉ CALIFICADOR	V
Dedicatorias	V
Agradecimientos	VI
Resumen	VII
Abstract	VIII
Índice de Contenidos	XI
Índice de Figuras	XIV
Índice de Tablas	XIV
CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN	1
1.1 Planteamiento del problema	1
1.2 Objetivos	3
1.2.1 Objetivo General	3
1.2.2 Objetivos Específicos	3
1.3 Alcance	3

1.4	Justificación	4
CAPÍTULO 2: MARCO TEÓRICO		5
2.1	Estado del Arte	5
2.2	Tecnologías implicadas	9
2.2.1	Serial TTL	9
2.2.2	LPWAN	10
2.2.3	LoRaWAN	12
2.2.4	LoRa	15
2.2.5	Arquitectura de la red LoRa	17
2.2.6	Análisis	21
2.2.7	Oscilaciones en estructuras sujetas a carga dinámica	22
CAPÍTULO 3: MARCO METODOLÓGICO		25
3.1	Modelo de investigación	25
3.2	Diseño de la investigación	26
3.2.1	Fase 1: Adquisición de información de fallas en puentes y sistemas IoT.	26
3.2.2	Fase 2: Diseño del Sistema IoT.	27
3.2.3	Fase 3: Implementación y pruebas.	28
3.3	Metodología para la selección de dispositivos	30
CAPÍTULO 4: RESULTADOS		31
4.1	Arquitectura del Sistema de Monitoreo	31
4.1.1	Nodo Final	32
4.1.2	Gateway LoRa	42
4.1.3	Servidor Propietario	45

4.1.4	Servidor Puente	47
4.1.5	Firebase	47
4.1.6	Almacenamiento de Datos	49
4.1.7	Gráfica de Datos	50
4.2	Pruebas de funcionamiento	53
4.2.1	Validación de sensores	54
4.2.2	Caracterización	56
4.2.3	Recepción de datos en TTN	57
4.2.4	Recepción de los comandos para la solicitud	58
4.2.5	Envío de datos al servidor propietario	60
4.2.6	Envío de datos al servidor puente	62
4.2.7	Visualización de los datos	64
CAPÍTULO 5: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES		65
5.1	Conclusiones	65
5.2	Recomendaciones	66
5.3	Trabajo a futuro	67
Bibliografía		67
Anexos		74
Anexo A. Implementación del Gateway y antena de 5 dBi		74
Anexo B. Gráficas recolectadas de la estructura.		78

Índice de Figuras

Fig. 1.1. Puente El Ejido de Caranqui a 4 de agosto de 2023 [4].	2
Fig. 2.1. Diagrama de conexiones de 2 dispositivos en comunicación serial asíncrona [24].	10
Fig. 2.2. Las diferentes Clases de nodos [29].	14
Fig. 2.3. Pila de protocolos de LoRaWAN [29].	15
Fig. 2.4. Arquitectura de la red LoRa [32].	17
Fig. 2.5. Proceso de comunicación por LoRa.	20
Fig. 2.6. a) Experimento de oscilaciones libres, b) evolución de la amplitud con el tiempo para un material elástico ideal en el que la amplitud A_0 permanece constante una vez retirada la fuerza de flexión, c) evolución de la amplitud con el tiempo para un material real [38].	23
Fig. 2.7. Estructura en reposo donde la inclinación señalada en rojo, permanece colineal a la estructura.	24
Fig. 2.8. Estructura en deflexión máxima, donde se genera una inclinación señalada de rojo.	24
Fig. 4.1. Arquitectura del sistema de monitoreo.	32
Fig. 4.2. WT901C-TTL [48].	33
Fig. 4.3. Mapeo de pines del RS 485 BL de Dragino [44]	34
Fig. 4.4. Funcionamiento del Nodo Final	35
Fig. 4.5. Diagrama del funcionamiento del programa para la caracterización de los datos y respuesta.	40

Fig. 4.6. wAP LR9 [50].	43
Fig. 4.7. Características de la antena [50].	43
Fig. 4.8. Antena para el wAP LR9 [50].	44
Fig. 4.9. Diagrama de flujo del programa de recepción y almacenamiento	50
Fig. 4.10. Interfaz para visualizar los datos recibidos.	51
Fig. 4.11. Diagrama del programa para graficar los datos.	53
Fig. 4.12. Interfaz del programa que se usa para verificar el funcionamiento del WT901C-TTL.	54
Fig. 4.13. En la parte izquierda se tiene la ubicación de los sensores en una misma superficie, siendo necesario para comparar las medidas obtenidas del eje X donde el inclinómetro digital y en el monitor presentan los mismos resultados bajo la misma apreciación.	55
Fig. 4.14. Proceso de comparación en superficies inclinadas, verificando los datos del inclinómetro digital y los reflejados en la pantalla en el eje X.	55
Fig. 4.15. Datos obtenidos directamente del sensor.	56
Fig. 4.16. Datos obtenidos posteriores al proceso de caracterización.	57
Fig. 4.17. Recepción del <i>payload</i>	58
Fig. 4.18. Comandos recibidos desde el RS485-BL	59
Fig. 4.19. Respuesta del microcontrolador	60
Fig. 4.20. Información completa en el servidor propietario	61
Fig. 4.21. Descomposición del <i>payload</i>	61
Fig. 4.22. Base de datos en MySQL	63
Fig. 4.23. Implementación del servidor puente	63
Fig. 4.24. Visualización de los datos obtenidos desde el sistema.	64

Índice de Tablas

Tabla 4.1. Especificaciones de WT901C-TTL [48].	33
Tabla 4.2. Configuración del microcontrolador	36
Tabla 4.3. Funciones encargadas de la caracterización.	39
Tabla 4.4. Comandos AT utilizados para la configuración.	41
Tabla 4.5. Configuración de Comandos	42
Tabla 4.6. Especificaciones del Gateway.	45
Tabla 4.7. Especificaciones del Gateway en TTN.	46
Tabla 4.8. Especificaciones del RS485-BL en TTN.	47
Tabla 4.9. Características de Firebase Realtime Database.	48

CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN

1.1. Planteamiento del problema

A lo largo del tiempo, las estructuras sujetas a cargas dinámicas enfrentan un desgaste progresivo, influenciado por diversos factores como condiciones ambientales, cambios imprevistos en el tráfico, prácticas de construcción deficientes o errores en los cálculos estructurales [1]. Este fenómeno es especialmente relevante en el caso de edificaciones, carreteras y, sobre todo, puentes, cuyo propósito es permitir el paso sobre obstáculos como ríos, lagos o terrenos abruptos [2].

Dado que los puentes están sometidos a cargas dinámicas y condiciones ambientales severas, su diseño debe ser robusto para soportar estos desafíos y cumplir su propósito. Sin embargo, a lo largo del tiempo, factores como las oscilaciones se vuelven cada vez más significativos, contribuyendo al desgaste progresivo de la estructura [3]. A pesar de que estos puentes están diseñados con rigidez, es importante reconocer que la deflexión está presente, en ocasiones no es visible a simple vista, continúa afectando la integridad estructural y puede eventualmente llevar a una falla crítica.

En el contexto específico de Ibarra-Ecuador, el rápido crecimiento poblacional ha generado una demanda creciente de nuevas vías de acceso. El flujo vehicular supera las capacidades para las que fueron originalmente diseñadas muchas estructuras, incluido el puente de El Ejido de Caranqui en la Av. Hernán Gonzales de Saa (ver Figura 1.1). Este puente, como tantos otros, se enfrentó a un deterioro significativo, evidenciado por fisuras, agrietamientos, corrosión y carbonatación del hormigón, todo lo cual obstaculizó el tránsito tanto de vehículos livianos como pesados, afectando la circulación de productos y el transporte de personas

en la zona [4]. Terminó sustituyendo a finales de 2023.



Fig. 1.1. Puente El Ejido de Caranqui a 4 de agosto de 2023 [4].

El mantenimiento adecuado del puente de El Ejido de Caranqui es crucial para prevenir consecuencias graves y potencialmente peligrosas en el futuro. Un colapso podría generar un impacto económico significativo al interrumpir el flujo comercial y logístico regional, afectando la productividad, el empleo y la calidad de vida. Además, las reparaciones de emergencia serían costosas, compitiendo con otros proyectos de infraestructura y desarrollo [5].

El desafío del desgaste en puentes debido al desarrollo urbano acelerado es una preocupación relevante que exige la adopción de estrategias preventivas, como el establecimiento de sistemas de monitoreo efectivos, para garantizar la seguridad y la funcionalidad de estas importantes infraestructuras a largo plazo.

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivo General

Desarrollar un sistema de monitoreo de oscilaciones en estructuras sujetas a cargas dinámicas utilizando tecnología IoT.

1.2.2. Objetivos Específicos

- Determinar las características de las oscilaciones relacionadas con fallas en estructuras sujetas a cargas dinámicas.
- Diseñar el sistema IoT para monitoreo de oscilaciones con comunicación remota.
- Implementar el sistema de monitoreo para obtención de datos directamente desde la estructura.

1.3. Alcance

Este trabajo tiene como finalidad recopilar datos a través de un sistema de monitoreo remoto en el puente de El Ejido de Caranqui, extrapolable a otras estructuras, independientemente de su composición o diseño. Se utilizarán gráficas generadas por el sistema IoT para visualizar los datos enviados por los sensores. Además, se desarrollará un sistema que permita mostrar estos datos en dispositivos remotos, con el fin de analizar posibles relaciones entre las variables medidas y la integridad estructural. Previo a la implementación, se calibrarán los instrumentos a utilizar para asegurar la precisión y fiabilidad de los datos. Una vez calibrados, se procederá con la instalación del sistema de monitoreo y la recolección de datos en tiempo real.

1.4. Justificación

Este estudio se justifica en la necesidad de implementar un sistema de monitoreo de oscilaciones en estructuras sometidas a cargas dinámicas. Esta necesidad surge debido al insuficiente control y seguimiento en estructuras. El monitoreo constante podría reducir significativamente los costos asociados a mantenimiento y reparación de obras públicas y a mejorar la seguridad de los usuarios.

En el ámbito académico, este estudio aportará conocimiento, al enfocarse en la implementación de sistemas de monitoreo para estructuras sometidas a cargas dinámicas. La recopilación y análisis de datos sobre el comportamiento estructural bajo estas condiciones proporcionará información fundamental para el diseño y la optimización de sistemas de control y monitoreo en tiempo real. Esto permitirá desarrollar estrategias más eficientes para prevenir fallas y maximizar la seguridad y durabilidad de las infraestructuras, contribuyendo así al desarrollo de soluciones innovadoras.

Desde el punto de vista ingenieril, la implementación de un sistema de monitoreo permitirá una mejor comprensión de las causas de falla en los puentes y otras estructuras similares de la ciudad. Esto conducirá a la adopción de medidas preventivas más efectivas y a la optimización de los recursos utilizados en la construcción y mantenimiento de infraestructuras.

En el contexto social, el impacto económico y humano de la interrupción del flujo de transporte debido a fallas estructurales es considerable. Un monitoreo efectivo ayudaría a evitar estas interrupciones, garantizando la seguridad de las personas y el flujo económico en las comunidades afectadas.

CAPÍTULO 2: MARCO TEÓRICO

2.1. Estado del Arte

El análisis de la respuesta estructural y las estrategias de diseño adecuadas son aspectos fundamentales para garantizar la estabilidad y la funcionalidad de infraestructuras críticas. Este enfoque permite mitigar riesgos frente a eventos extremos y optimizar el desempeño de las estructuras bajo diversas condiciones.

La tecnología y la ingeniería desempeñan un papel crucial en la mejora y sostenibilidad de infraestructuras críticas, así como en la implementación de soluciones innovadoras para desafíos modernos. Permitiendo mejorar la seguridad, la eficiencia y el impacto ambiental en diversos ámbitos. A continuación, se detallan investigaciones relevantes, destacando las tecnologías y enfoques utilizados.

El análisis de vulnerabilidad en infraestructuras críticas frente a eventos extremos resalta la importancia de un diseño y mantenimiento adecuados para garantizar la seguridad y durabilidad de estructuras como puentes y carreteras [6].

En el ámbito académico, se realizan investigaciones detalladas sobre la respuesta dinámica y patologías en puentes peatonales metálicos. Estos análisis emplean modelos matemáticos para comprender mejor el comportamiento estructural y mejorar la calidad de las infraestructuras [7].

En el trabajo [8] se investiga el diseño de amortiguadores de masa sintonizados (TMD) para reducir la respuesta dinámica de puentes ante fuerzas externas. Al controlar las oscilaciones, los TMD mejoran la estabilidad y seguridad estructural, disipando energía mediante la variación de masa, amortiguación y rigidez.

Se estudia el diseño de puentes en concreto postensado utilizando sistemas de aislamiento y disipadores sísmicos para mejorar la resistencia estructural en Piura. El uso de puntales tubulares regulables reduce deformaciones y mejora la estabilidad de las vigas principales bajo esfuerzos de corte y momento [9].

A medida que las tecnologías avanzan, el Internet de las Cosas (IoT) se ha consolidado como una herramienta clave en la mejora del monitoreo y la gestión de infraestructuras críticas. La integración de sensores y dispositivos inteligentes ha permitido un control más preciso, aumentando significativamente la capacidad de detectar problemas estructurales.

La aplicación (IoT) en el monitoreo y mantenimiento de infraestructuras ha demostrado ser una herramienta poderosa para garantizar su seguridad y funcionalidad. Ejemplo de esto es el desarrollo de un sistema de protección catódica (CP) de tuberías mediante IoT y una plataforma en la nube, utilizando una placa de circuito impreso (PCB) para medir y controlar la corriente y el voltaje en tiempo real. Este sistema mejora la gestión y seguridad de los datos, permitiendo una detección temprana de problemas y reduciendo el tiempo de inactividad [10].

Se diseña un sistema electrónico con microcontrolador ESP32 y sensor MPU 6050 para monitorear vibraciones en estructuras civiles. El sistema es autosuficiente gracias a un panel solar, y permite la medición y transmisión de datos a una base en línea, asegurando un control remoto eficiente y de bajo costo [11].

Además de su uso en infraestructuras críticas, el IoT se ha expandido hacia la implementación de soluciones innovadoras en áreas como la agricultura, la protección forestal y las ciudades inteligentes. En este contexto, las redes de baja frecuencia como LoRaWAN han demostrado ser herramientas eficaces debido a su gran alcance y capacidad de conexión en entornos remotos.

El monitoreo inteligente de infraestructuras mediante IoT ha sido ampliamente imple-

mentado en diversas áreas. En [12], se destacan sistemas de monitoreo en invernaderos que permiten una comunicación efectiva entre dispositivos y sensores, facilitando la toma de decisiones basada en datos recopilados en tiempo real.

Así mismo, se implementa sistemas de monitoreo IoT para la protección forestal. Estos sistemas utilizan tecnología avanzada y comunicación de largo alcance para garantizar la vigilancia y preservación de recursos naturales, empleando tecnología LoRa y redes LoRaWAN debido a su gran alcance al ser una red de baja frecuencia, almacenando los datos en la nube utilizando The Things Network (TTN) [13].

En [14], se desarrolla la implementación de tecnología IoT junto con redes LoRaWAN en sistemas de monitoreo, aprovechando el largo alcance que poseen este tipo de redes. Junto con el uso de microcontroladores Arduino y servidores TTN, ha permitido un flujo efectivo de datos y su almacenamiento en la nube para su posterior visualización.

La planificación de la infraestructura de medición en ciudades inteligentes basada en LoRaWAN implica seleccionar la tecnología de radio adecuada y optimizar la conservación de energía. Este enfoque se destaca por su alta penetración de señal y cobertura en áreas urbanas, facilitando la monitorización y recolección de datos de medidores de electricidad [15].

El desarrollo de redes de baja frecuencia, como LoRa con su modelo LoRaWAN, que ha destacado por su capacidad para atravesar grandes distancias. Se ha profundizado en las ventajas y desventajas de estas redes, proporcionando una arquitectura que permite la comunicación eficaz entre dispositivos ubicados en áreas remotas o de difícil acceso, como se muestra en [16].

Se realiza un estudio comprensivo sobre la arquitectura de seguridad del IoT, abordando los principales desafíos y tecnologías clave como la Identificación por Radiofrecuencia

(RFID) y las Redes de Sensores Inalámbricos (WSN). El estudio también discute protocolos adecuados para la infraestructura IoT y herramientas y plataformas de código abierto para su desarrollo, además de señalar cuestiones abiertas y posibles soluciones futuras [17].

El desarrollo de tecnologías complementarias como la computación en el borde (Edge computing) y la robótica han permitido extender las capacidades del IoT hacia nuevas áreas de aplicación. Estas innovaciones mejoran tanto la eficiencia del procesamiento de datos como la autonomía de los sistemas, abriendo nuevas posibilidades en diversos sectores.

Para mejorar el rendimiento de la red IoT, se propone integrar la computación en el borde (Edge computing) en la arquitectura del IoT. Esta integración permite el procesamiento y almacenamiento de datos más cerca de los dispositivos o sensores que recogen los datos en bruto, reduciendo así la latencia y el ancho de banda necesarios [18].

Un sistema de puerta de enlace frontal con conversión de protocolo de comunicación serial y plataformas de computación en el borde ha sido presentado, mejorando la integración y el análisis automático de datos. Este sistema reduce el tiempo de procesamiento de datos y la cantidad de buses necesarios [19].

El proyecto ROBOGait combina robótica móvil y cámaras de profundidad RGB-D para analizar la marcha de atletas. Con un sistema de control y navegación autónoma basado en ROS 2 y Nav2, se logra seguimiento preciso en entornos no estructurados, optimizando la captura de movimiento corporal durante la carrera, utilizando IMU en el análisis de vibraciones [20].

Finalmente, se desarrolla un sistema electrónico de monitoreo para plantas solares que analiza parámetros operativos y ambientales. Utiliza microcontroladores para la recolección y análisis de datos, y módulos RF para transmitir información al servidor propietario, eliminando la necesidad de redes wifi en parques solares remotos [21].

2.2. Tecnologías implicadas

En esta sección, se analizan tecnologías fundamentales que permiten superar las limitaciones de infraestructura para el monitoreo en entornos remotos. Estas tecnologías, desde redes LPWAN hasta arquitecturas específicas como LoRaWAN, ofrecen soluciones para la transmisión de datos a larga distancia con alta eficiencia energética, permitiendo la implementación de sistemas IoT robustos y escalables.

2.2.1. Serial TTL

Es parte de las familias lógicas, siendo la más utilizada durante los últimos 20 años [22], teniendo así una gran variedad de componentes en el mercado, lo que facilita el poder trabajar con este tipo de tecnologías. Generalmente, se puede observar valores entre 0 y 5v utilizados para comunicarse. Consiste en enviar por puerto serial bits de información, con una capacidad de 1 bit a la vez [23], topando conceptos como: baudios, velocidad de transmisión que comúnmente se trabaja a 9600 bps (bits por segundo). A continuación se presenta algunos de los conceptos más importantes que se maneja para que el proceso de transmisión no tenga ningún inconveniente y la información que se está enviando no se pierda o sea la incorrecta.

- Bits de datos: Cuantos bits se envía en cada paquete, generalmente 8 bits.
- Bits de paridad: Añade bits para verificar la transmisión, utilizado como mecanismo para controlar errores.
- Bits de parada: Se usa para determinar el inicio y el final de la transmisión.
- Control de flujo: Se asegura que el receptor no sea abrumado por grandes cantidades de información.

Para la comunicación utiliza los pines RX (recepción) y TX (transmisión) como se muestra en la Figura 2.1 con el siguiente diagrama de conexiones entre dispositivos tomado de [24].

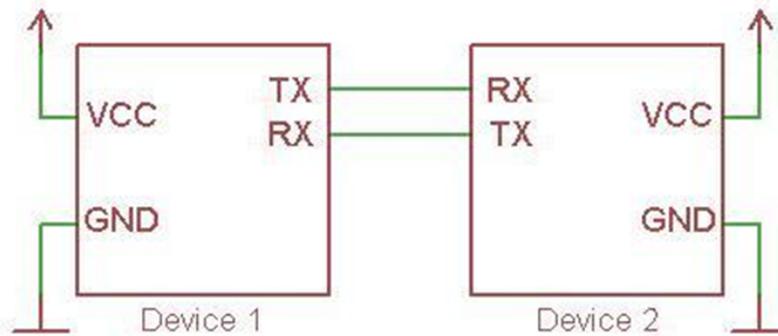


Fig. 2.1. Diagrama de conexiones de 2 dispositivos en comunicación serial asíncrona [24].

Teniendo en cuenta los procesos de comunicación, una de las soluciones más óptimas es el conversor RS485BL [25], capaz de transmitir la señal TTL a LoRaWAN.

2.2.2. LPWAN

Las redes Low Power Wide Area Network (LPWAN) son una tecnología de comunicaciones que permite la transmisión de datos a largas distancias con un consumo de energía muy bajo. Estas redes están especialmente diseñadas para facilitar la conectividad en áreas donde otras tecnologías de comunicación, como wifi o redes móviles tradicionales, no son viables debido a la falta de infraestructura o el alto costo de implementación [26]. Por su capacidad para cubrir grandes extensiones geográficas, las LPWAN son ideales para entornos remotos y dispersos. Su uso es particularmente relevante en aplicaciones de monitoreo y control, como en el sector agrícola, donde las condiciones del terreno suelen dificultar la instalación de redes convencionales. En este contexto, las LPWAN permiten la conexión de sensores y dispositivos IoT a lo largo de grandes áreas de cultivo o zonas rurales.

Uno de los principales beneficios de las LPWAN es su amplia cobertura, que permite

conectar dispositivos en áreas extensas sin la necesidad de instalar equipos adicionales. Esto significa que una única estación base puede cubrir una gran cantidad de dispositivos distribuidos en por toda la zona de cobertura, misma que cubre grandes extensiones de terreno, lo que es esencial en aplicaciones que requieren monitoreo de áreas amplias, como en la agricultura de precisión o el monitoreo ambiental. Al no depender de infraestructura densa, las LPWAN reducen la complejidad operativa y los costos asociados con la implementación de redes tradicionales.

Otro beneficio significativo es el bajo consumo energético de los dispositivos conectados a estas redes [26]. Debido a su diseño optimizado para transmitir pequeñas cantidades de datos de manera eficiente, los dispositivos pueden funcionar durante años con una sola batería, lo que minimiza los costos de mantenimiento y reemplazo. Esta característica es clave en aplicaciones donde el acceso para cambiar baterías es limitado, como en sensores desplegados en campos agrícolas o en estaciones remotas de monitoreo ambiental.

A lo que se suma el hecho de que las LPWAN operan en frecuencias sin licencia, convirtiéndose en una opción accesible y económica para muchas aplicaciones. Al no tener que pagar tarifas por licencias de espectro, las empresas pueden reducir los costos operativos de implementación y mantenimiento, lo que hace que estas redes sean especialmente atractivas en entornos con presupuestos limitados. Esta accesibilidad, junto con su bajo costo de operación y la facilidad de despliegue, convierte a las LPWAN en una solución ideal para proyectos de monitoreo a gran escala en áreas rurales o aisladas, tal como se menciona en [27].

2.2.3. LoRaWAN

LoRaWAN (Long Range Wide Area Network), uno de los protocolos más utilizados dentro del marco de redes LPWAN, ha revolucionado la forma en que los dispositivos IoT se conectan en entornos remotos gracias a su alcance, bajo consumo energético y robustez.

Es un protocolo de comunicación LPWAN que ha ganado una considerable adopción en diversas industrias debido a su capacidad de ofrecer un gran alcance y un bajo consumo energético, características clave para su uso en aplicaciones remotas y en Internet de las Cosas (IoT). LoRaWAN se construye sobre la capa física de LoRa, que es la tecnología encargada de la transmisión de señales de radio a larga distancia con mínima potencia. LoRaWAN, como protocolo, se encarga de la gestión de la comunicación entre dispositivos finales y gateways, regulando aspectos como la seguridad, la programación de la transmisión y la gestión de la red. Esta combinación entre la capa física de LoRa y el protocolo LoRaWAN permite que las redes puedan operar de manera eficiente, incluso en entornos con baja cobertura o en lugares de difícil acceso, lo que hace que la tecnología sea adecuada para aplicaciones como la gestión agrícola, el monitoreo de infraestructuras o el control de sistemas remotos [27]. Para entender cómo LoRaWAN optimiza la conectividad en aplicaciones IoT, es esencial analizar su arquitectura básica y las ventajas que ofrece su topología estrella.

2.2.3.1. Topología y funcionamiento

LoRaWAN se basa en una topología estrella, lo que significa que los nodos finales se conectan directamente con un gateway central, el cual se encarga de la comunicación con el servidor de red. Esta estructura permite que los dispositivos finales (nodos) sean relativamente simples, ya que toda la complejidad del sistema se concentra en el dispositivo base, es decir,

el gateway. En lugar de tener una red completamente descentralizada o malla, donde todos los dispositivos interactúan entre sí, en la topología estrella los nodos solo necesitan comunicarse con el gateway, lo que simplifica el diseño de la red y reduce el costo de los dispositivos finales. El alcance de LoRaWAN puede ser del orden de kilómetros, lo que la convierte en una opción ideal para su uso en zonas rurales o áreas de difícil acceso, donde otras tecnologías de comunicación, como wifi, no podrían ofrecer un rendimiento adecuado. Esta eficiencia en la topología y el funcionamiento permite que LoRaWAN sea una excelente opción para la conectividad en entornos remotos y para aplicaciones que requieren monitoreo de larga distancia [28].

2.2.3.2. Clases de nodos

LoRaWAN se distingue por su flexibilidad en cuanto a los modos de comunicación. Como se menciona en el trabajo de [29] y en [30] se tiene tres clases de nodos: A, B y C.

- Clase A: El dispositivo final gestiona tanto la transmisión como la planificación de las ventanas de recepción. Después de enviar un paquete de datos, se abren dos ventanas de recepción; si los datos se reciben en la primera ventana, la segunda se desactiva. Este esquema es el más eficiente en términos energéticos y es ideal para aplicaciones donde el dispositivo solo necesita enviar datos, como sensores remotos o dispositivos de monitoreo que no requieren recibir información frecuentemente.
- Clase B: Permite que el dispositivo abra ventanas de recepción adicionales, incluso sin haber realizado una transmisión previa. Esto se logra gracias al envío de “beacons” desde la pasarela, que sincronizan el dispositivo y le indican cuándo debe estar disponible para recibir datos. Aunque esta capacidad de recibir datos más frecuentemente aumenta la disponibilidad del dispositivo, también incrementa su consumo energéti-

co. Es adecuada para aplicaciones que necesitan una comunicación bidireccional más frecuente, como sistemas de control remoto o monitoreo.

- Clase C: Están en modo de recepción permanente, lo que les permite recibir datos con la menor latencia. Este modo es ideal para aplicaciones que requieren comunicación en tiempo real, pero a costa de un mayor consumo energético, ya que el dispositivo está siempre escuchando, lo que reduce la duración de la batería. Es apropiado para sistemas de control en tiempo crítico o aplicaciones donde la latencia es crítica.

Cada clase de nodo se elige según las necesidades específicas de la aplicación, balanceando la disponibilidad de comunicación con los requisitos de consumo energético. Los nodos de clase A son ideales para aplicaciones que priorizan la eficiencia energética, mientras que las clases B y C ofrecen opciones para aquellos que requieren mayor disponibilidad de comunicación, como se muestra en la Figura 2.2.

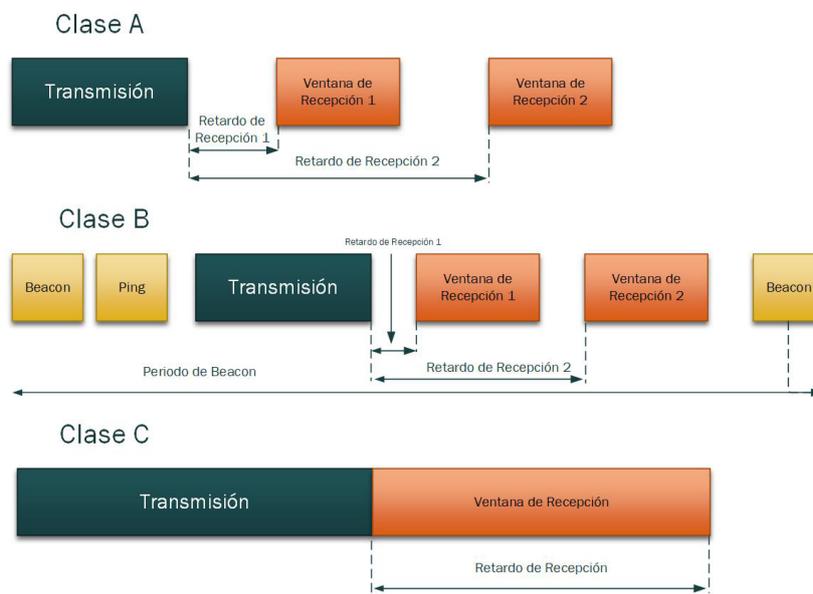


Fig. 2.2. Las diferentes Clases de nodos [29].

Además de la clasificación de nodos, el funcionamiento de LoRaWAN se sustenta en una pila de protocolos diseñada para garantizar su eficiencia operativa.

2.2.3.3. Pila de protocolos

LoRaWAN opera sobre una arquitectura de múltiples capas, donde la capa física es proporcionada por LoRa (Long Range), que es responsable de la modulación y transmisión de datos a larga distancia con bajo consumo de energía [30]. Esta capa física permite la comunicación de largo alcance entre los dispositivos finales y los gateways, utilizando un espectro de radio sub-GHz no licenciado.

Por encima de la capa física, LoRaWAN define una serie de protocolos como se puede observar en la Figura 2.3, mismos que sirven para gestionar la comunicación a nivel de enlace de datos, redes y aplicaciones. Estos protocolos se encargan de asegurar la integridad de los datos, la gestión de las redes de gateways y la interacción con las aplicaciones finales.

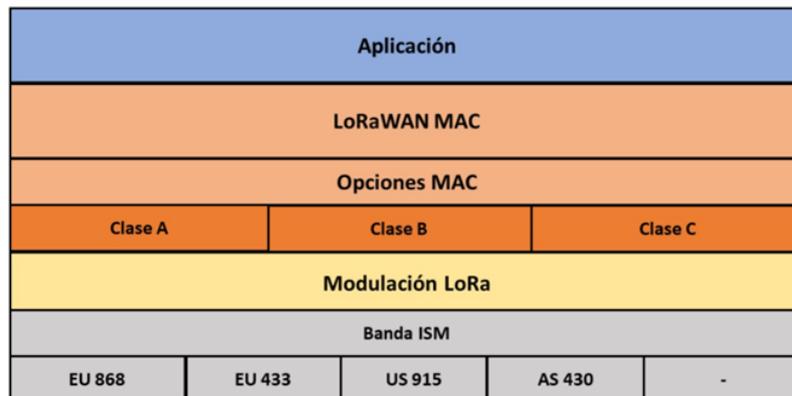


Fig. 2.3. Pila de protocolos de LoRaWAN [29].

2.2.4. LoRa

LoRa es la capa física desarrollada por Semtech, diseñada para proporcionar la capacidad de transmitir datos a largas distancias utilizando modulación por espectro ensanchado. Esta tecnología es esencial para aplicaciones de Internet de las Cosas (IoT) que requieren baja potencia y amplia cobertura [31]. LoRa actúa como el soporte fundamental para LoRaWAN,

el protocolo de comunicación que opera sobre esta capa física. La principal función de LoRa es garantizar la transmisión de datos de manera confiable, incluso en entornos con interferencias, estableciendo una base sólida para las redes de IoT.

2.2.4.1. Características técnicas

LoRa se distingue por varias características técnicas que la hacen adecuada para aplicaciones de IoT. Una de sus ventajas clave es su tolerancia a interferencias, lo que le permite mantener comunicaciones confiables incluso en entornos ruidosos. Además, ofrece la posibilidad de comunicación directa entre nodos, eliminando la necesidad de infraestructuras complejas en ciertas aplicaciones. Por otra parte, su flexibilidad facilita la integración de gateways con redes existentes, lo que permite ampliar la cobertura y las capacidades de las infraestructuras de comunicación actuales [27]. Estas propiedades la convierten en una opción preferida para aplicaciones que requieren bajo consumo de energía y gran alcance.

2.2.4.2. Relación con LoRaWAN

La relación entre LoRa y LoRaWAN es complementaria y esencial para el funcionamiento eficiente de redes IoT. Mientras que LoRa opera como la capa física que transmite los datos, LoRaWAN se encarga de definir el protocolo de comunicación y la gestión de la red. En este sentido, LoRa proporciona el medio físico necesario para que LoRaWAN implemente funciones como la seguridad, la organización de los dispositivos y la gestión del espectro. Esta interacción permite que las redes LoRaWAN ofrezcan soluciones escalables y seguras para una amplia variedad de aplicaciones, desde el monitoreo industrial hasta la agricultura inteligente.

2.2.5. Arquitectura de la red LoRa

La arquitectura del sistema de monitoreo de puentes se basa en el modelo jerárquico típico de LoRaWAN, que incluye tres componentes principales: sensores o nodos, gateways y un servidor propietario, ya sea en la nube o local, como se muestra en la Figura 2.4. Este diseño permite una comunicación eficiente y escalable, donde los sensores recolectan datos y los transmiten a través de gateways hacia el servidor propietario [32]. En el servidor, los datos son procesados y analizados, lo que facilita la detección de anomalías, la toma de decisiones informadas y el mantenimiento preventivo. Esta arquitectura garantiza un monitoreo continuo, de bajo consumo energético y a largo alcance.

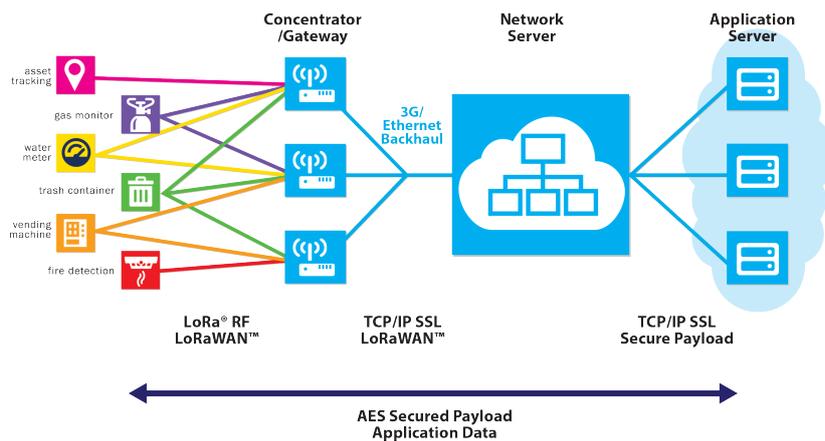


Fig. 2.4. Arquitectura de la red LoRa [32].

2.2.5.1. Nodos o sensores

Los nodos o sensores son dispositivos fundamentales en el sistema de monitoreo, ya que interactúan directamente con el sistema. Su función principal es recopilar datos clave relacionados con el estado estructural y ambiental del puente, como vibraciones, inclinación, temperatura y humedad. Estos datos proporcionan información esencial para evaluar el comportamiento de la infraestructura y detectar posibles problemas antes de que se conviertan en

riesgos. En ciertos casos se encargan de realizar acciones que afecten al sistema, activando actuadores o retroalimentando sensores.

Los nodos están diseñados para operar con bajo consumo de energía, lo que permite una larga autonomía, incluso en ubicaciones donde el mantenimiento regular puede ser complicado. Cada nodo está equipado con transmisores LoRa, los cuales garantizan la comunicación a largo alcance y la eficiencia en la transmisión de datos, incluso en entornos con interferencias.

2.2.5.2. *Gateway*

Actuando como un intermediario entre los nodos sensores y el servidor propietario. Su principal función es recibir los datos recopilados por los nodos a través de la tecnología LoRaWAN y transmitirlos al servidor mediante internet o una red privada. Este proceso asegura una transferencia eficiente y confiable de información para su análisis posterior.

El gateway está diseñado para manejar múltiples nodos de forma simultánea, conformado por 16 canales, con soporte para cientos de dispositivos conectados [33], lo que lo hace ideal para sistemas de monitoreo a gran escala. Ofrece conectividad dual, utilizando LoRaWAN para comunicarse con los nodos sensores y tecnologías como wifi, Ethernet o redes celulares para establecer conexión con el servidor propietario. Esta versatilidad permite adaptar el sistema a diferentes entornos y condiciones de infraestructura.

2.2.5.3. *Servidor propietario*

El servidor propietario es responsable de procesar, analizar y almacenar los datos transmitidos por las gateways, asegurando que la información sea accesible y útil para el monitoreo del puente. Entre las alternativas disponibles, los servidores de red como The Things Network (TTN) [34] ofrecen una solución robusta para gestionar la comunicación entre los nodos

sensores y las aplicaciones finales, simplificando la implementación de redes LoRaWAN.

Entre sus funciones principales se tiene.

- **Procesamiento y distribución de datos:** El servidor de red recibe los datos desde los gateways, los procesa y los distribuye a las aplicaciones correspondientes, garantizando que lleguen en el formato adecuado para su análisis o visualización.
- **Gestión de seguridad y autenticación:** Mantiene altos estándares de seguridad, verificando la autenticidad de los dispositivos conectados y protegiendo los datos frente a accesos no autorizados. Esto incluye mecanismos como la autenticación mutua y el cifrado de extremo a extremo [35].
- **Integridad de los datos:** Asegura que los datos lleguen de forma completa y sin alteraciones desde los nodos sensores hasta las aplicaciones finales.

The Things Network (TTN) es una plataforma global de código abierto diseñada para facilitar la implementación y gestión de redes LoRaWAN. TTN actúa como un servidor de red (Network Server) que conecta los dispositivos IoT a aplicaciones específicas mediante gateways que operan bajo el protocolo LoRaWAN.

La plataforma permite a los usuarios construir redes IoT escalables y seguras sin necesidad de infraestructura compleja. TTN se encarga de la comunicación entre los nodos, gateways y servidores de aplicaciones [34].

2.2.5.4. Proceso de comunicación

En la Figura **2.5** se representa el proceso de comunicación que se lleva con la arquitectura LoRa, representándose de manera general.

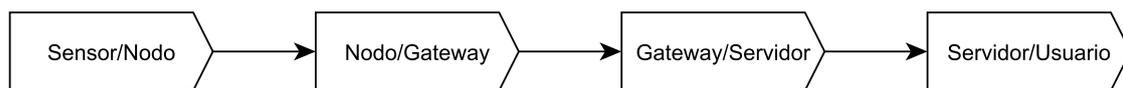


Fig. 2.5. Proceso de comunicación por LoRa.

El proceso de comunicación comienza con los sensores instalados en diferentes puntos del puente, que recopilan datos físicos como vibraciones, inclinación, temperatura o humedad. Estos datos se convierten en señales digitales que los dispositivos, equipados con transmisores LoRa, envían de forma eficiente y con bajo consumo de energía.

Los nodos transmiten los datos recolectados hacia el gateway, aprovechando las ventajas de la tecnología LoRaWAN. Esta comunicación puede abarcar varios kilómetros como se presenta en el estudio en [36] que muestra un alcance de hasta 20 km, dependiendo de la ubicación, lo que asegura que incluso los sensores ubicados en puntos remotos puedan enviar información sin interrupciones.

El gateway recibe los datos de los nodos, los organiza y los empaqueta para su envío al servidor propietario. Dependiendo de la infraestructura disponible, esta transmisión se realiza mediante tecnologías como wifi, Ethernet o redes celulares. Este paso asegura que los datos lleguen al servidor de manera confiable y en tiempo útil.

En el servidor propietario, los datos son procesados, analizados y almacenados. Posteriormente, la información procesada se presenta al usuario final desde navegadores web o aplicaciones móviles. Estas herramientas permiten al usuario interpretar los datos fácilmente, recibir alertas y tomar decisiones basadas en la información.

2.2.6. Análisis

Los sistemas IoT que trabajan con LoRaWAN presentan ventajas con respecto a la distancia en la que se puede comunicar con la base, dando un proceso más simple y sin complicaciones al momento de utilizar dispositivos intermedios o repetidores que reenvíen la señal para lograr el alcance requerido. Al trabajar a baja potencia permite el ahorro de energía, adicional a esto la mayoría de los dispositivos, respecto a su configuración pueden trabajar invernando lo que alarga la duración de la batería, siendo una opción factible para trabajar en zonas de difícil acceso y el dispositivo puede estar trabajando sin intervención en largos periodos de tiempo. Como puntos en contra, es su baja velocidad, lo que dificulta el monitoreo a tiempo real, pero tras diversas técnicas puede darse este tipo de aplicaciones, la capacidad limitada de transmisión de datos, sin embargo, para aplicaciones de monitoreo de datos es suficiente.

La factibilidad para desarrollar un proyecto IoT para monitoreo es amplia, ya que se cuenta con gran variedad de sistemas de monitoreos ya desarrollados y con la facilidad de las herramientas que se tiene hoy en día, se estructura el sistema de monitoreo que más se ajuste a la necesidad si limitarnos a uno ya hecho.

La adaptabilidad de los sistemas permite desarrollar proyectos con varias soluciones a las problemáticas que se tenga, con la posibilidad de implementar sistemas, sensores, actuadores que no necesariamente mantenga una capa física LoRa, deja a las aplicaciones sin restricciones, al utilizar un dispositivo que permita transmitir hacia LoRaWAN.

En este trabajo solo se realizará el proceso de recepción de datos, por lo que no se interactuará con el sistema físico, de este modo, el sensor envía datos al gateway, el cual se encarga de recibirlos y mandar al servidor para posteriormente mostrarlo en los dispositivos para el usuario final.

Estas tecnologías no solo ofrecen una solución teórica al desafío de la conectividad en áreas remotas, sino que su implementación práctica, como se detalla en el capítulo siguiente, demuestra su potencial en aplicaciones específicas como el monitoreo de estructuras dinámicas.

2.2.7. Oscilaciones en estructuras sujetas a carga dinámica

Las fluctuaciones producidas por las cargas que atraviesan la estructura pueden provocar daños significativos, provocando deformaciones, crecimiento de la fatiga, agrietamiento [8]. Con el paso del tiempo, la integridad estructural se ve seriamente afectada, lo que puede llegar a consecuencias catastróficas y pérdidas de dinero bastante elevadas, por no tener una detección temprana de lo que está ocurriendo en la estructura.

En las oscilaciones se tiene conceptos como el periodo (T) el tiempo en el que tarda en realizar un ciclo oscilatorio, la frecuencia (f) el número de repeticiones que se realiza en un tiempo determinado, amplitud (A) la cual son las posiciones máximas que puede tener con referencia en un punto de equilibrio [37]. En este punto también se puede considerar un factor atenuante o de amortiguamiento, caso contrario el sistema seguiría oscilando infinitamente. Las oscilaciones se pueden clasificar de la siguiente manera tal como se lo presenta en [8].

En la Figura 2.6, tomada del trabajo de [38], donde se representa el comportamiento de las oscilaciones de manera gráfica.

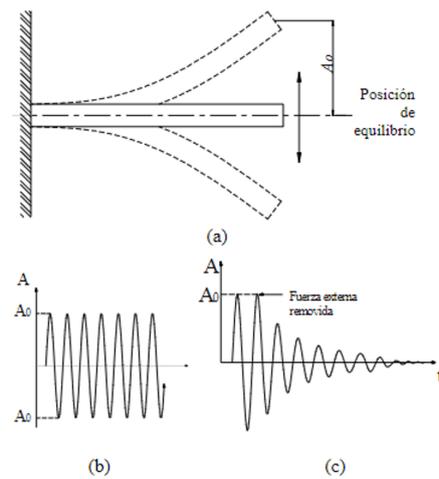


Fig. 2.6. a) Experimento de oscilaciones libres, b) evolución de la amplitud con el tiempo para un material elástico ideal en el que la amplitud A_0 permanece constante una vez retirada la fuerza de flexión, c) evolución de la amplitud con el tiempo para un material real [38].

Este trabajo se focaliza en el comportamiento de las oscilaciones, debido a que es un factor presente en la mayoría de casos en los que una estructura se encuentra sometida a carga dinámica. La prioridad es el monitoreo de lo que sucede en la estructura, tanto de manera analítica como gráfica.

Las oscilaciones presentes, causadas por los vehículos que transitan por la estructura, se incrementarán a medida que la integridad estructural se vea afectada por el desgaste [39]. En la estructura que se implementa el sistema para la recolección de datos, las oscilaciones serán causadas por la deflexión estructural. A pesar de la robustez de la construcción, este factor seguirá presente, y a medida que la deflexión aumente, las oscilaciones también lo harán.

Teniendo en cuenta las diferentes estructuras, como se puede observar en los trabajos de [40], [41], [42] y, por fines prácticos, se simplifica el diseño y análisis a una cuerda sujeta en 2 puntos de apoyo, como se muestra en la Figura 2.7. Esto con la finalidad de entender mejor el movimiento que realiza un vehículo al pasar por el puente.



Fig. 2.7. Estructura en reposo donde la inclinación señalada en rojo, permanece colineal a la estructura.

En el estado de reposo, la estructura del puente es perpendicular a las columnas, simplificando, la cuerda es perpendicular.

Se agrega un valor supuesto e imaginario para la deflexión máxima, como se muestra en la Figura 2.8 con la finalidad de entender el funcionamiento y movimiento de la estructura, para poder analizar la mejor forma de tomar los datos desde la estructura.

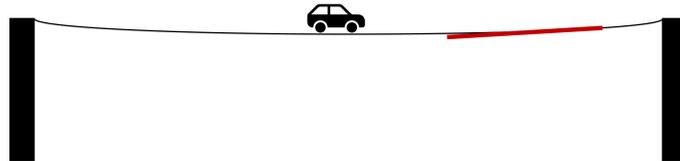


Fig. 2.8. Estructura en deflexión máxima, donde se genera una inclinación señalada de rojo.

Considerando el funcionamiento y comportamiento de las oscilaciones en los puentes, se puede observar que la estructura presenta cambios en la inclinación, por lo tanto, la mejor forma de obtener las lecturas es mediante una IMU (*Inertial Medition Unit o Unidad de Medición de Inercia*) capas de detectar los cambios de inclinación en la estructura. Revisar el trabajo de [43] donde se desarrolla el tema de las IMU.

CAPÍTULO 3: MARCO METODOLÓGICO

En este capítulo se presenta la metodología utilizada para el desarrollo del proyecto, detallando el enfoque de investigación y las fases implementadas para alcanzar los objetivos planteados. Se describe el modelo de investigación adoptado, así como el diseño metodológico que guía la recopilación de información, el desarrollo del sistema IoT y su posterior implementación en estructuras de puentes sometidas a cargas dinámicas.

El modelo de investigación se fundamenta en un enfoque aplicado, combinando investigación documental, de campo y experimental, para garantizar una comprensión integral del problema y el desarrollo de una solución efectiva. Posteriormente, se detalla el diseño de la investigación, estructurado en tres fases principales, como la adquisición de información sobre fallas en puentes y tecnologías IoT, el diseño del sistema de monitoreo y su implementación con pruebas en condiciones reales.

Se incluyen las metodologías empleadas para la selección de los dispositivos del sistema IoT, asegurando la elección de tecnologías adecuadas para la recolección, transmisión y almacenamiento de datos, necesario para el sistema de monitoreo.

3.1. Modelo de investigación

Este trabajo de integración curricular se lleva a cabo desde la perspectiva de la ingeniería a través de una investigación aplicada, que se distingue por tratar problemas concretos y prácticos, con la finalidad de producir saberes que puedan ser utilizados directamente para solucionar situaciones específicas en la práctica [44].

Para lograr esto, se desarrollará un sistema de monitoreo IoT para estructuras de puentes sujetas a cargas dinámicas, con el propósito de resolver problemas relacionados con la

integridad estructural y la seguridad de estas. Esta metodología se alinea con la definición proporcionada en [44].

Dado que se requiere una comprensión profunda de las causas de fallas en puentes y de las tecnologías IoT aplicables al monitoreo de estas estructuras, se lleva a cabo una investigación documental. Esta etapa involucra el análisis de libros, artículos especializados, trabajos de grado anteriores y otros recursos académicos relevantes [45]. Asimismo, se realiza una investigación de campo que implica visitar diferentes estructuras sujetas a cargas dinámicas, entendiendo el comportamiento y correcto funcionamiento [46].

La investigación también tiene un enfoque descriptivo, detallando las características del objeto de estudio, que en este caso son las variables críticas de monitoreo en puentes y las tecnologías IoT adecuadas para su implementación [45].

Se implementa una investigación experimental para probar el funcionamiento del sistema IoT en condiciones reales y analizar los resultados obtenidos [46].

3.2. Diseño de la investigación

Para el desarrollo de este proyecto, se realizaron diversas actividades individuales con el fin de alcanzar los objetivos planteados. Se describe de manera secuencial el proceso llevado a cabo durante el diseño y levantamiento del sistema IoT destinado al monitoreo de oscilaciones en puentes sometidos a cargas dinámicas.

3.2.1. Fase 1: Adquisición de información de fallas en puentes y sistemas IoT.

En esta fase, se recopila la información necesaria para comprender las causas de fallas en puentes y las tecnologías IoT aplicables al monitoreo de estas estructuras. Esto permitirá definir una estructura clara del proyecto y enfocarse en los puntos clave del problema.

Actividad 1: Revisión de artículos, proyectos y trabajos de grado que evidencien las principales causas de fallas en puentes, con el objetivo de identificar posibles variables que puedan ser monitoreadas.

Actividad 2: Determinación de la variable crítica a monitorear en puentes. Se definirá y centrará el proyecto en torno a la variable identificada como causante de fallas en puentes. Se realizará un breve análisis de la importancia de monitorear esta variable y cómo afecta al estado de la estructura.

Actividad 3: Investigación de tecnologías IoT aplicables al monitoreo de estructuras sujetas a carga dinámica. Se investigarán los sistemas IoT que pueden ayudar a cumplir con el propósito de monitorear la variable identificada, considerando la distancia y el método de conexión adecuado para este ámbito.

Actividad 4: Estudio de tecnologías de comunicación de baja potencia para su uso en monitoreo IoT. Se indagarán tecnologías de comunicación de baja potencia que ofrezcan mejor alcance y fiabilidad para la comunicación entre los dispositivos del sistema IoT a desarrollar.

Actividad 5: Selección y definición de los métodos para medir oscilaciones en puentes. Con la información adquirida, se definirá la metodología a desarrollar, estableciendo un primer boceto del sistema y los métodos de comunicación que se utilizarán en el proyecto.

Esta fase se ha desarrollado en el **CAPÍTULO 2: MARCO TEÓRICO**, cumpliendo cada una de las actividades.

3.2.2. Fase 2: Diseño del Sistema IoT.

En esta fase, se diseña el sistema de comunicación IoT, asegurando que esté preparado para ser implementado con los equipos adecuados y listo para la recopilación de datos en el

campo.

Actividad 6: Desarrollo del diseño conceptual y detallado de la estructura IoT para el monitoreo del puente. Se esquematizará el proceso de comunicación entre los dispositivos, preparando un sistema IoT listo para desarrollarse físicamente.

Actividad 7: Identificación y selección de los dispositivos necesarios para la interconexión del sistema IoT. Se investigarán y seleccionarán los equipos necesarios para establecer la red de comunicación entre los diferentes componentes del sistema IoT, considerando el esquema previamente definido.

Actividad 8: Adquisición de los dispositivos necesarios para el monitoreo y levantamiento de sistema. Se revisarán catálogos, fichas técnicas y métodos de compra para adquirir los dispositivos seleccionados, permitiendo el desarrollo del sistema IoT.

Actividad 9: Configuración y pruebas de funcionamiento de los equipos adquiridos. Se realizarán pruebas de funcionamiento de los equipos y sensores para verificar su correcto funcionamiento y garantizar la fiabilidad del sistema.

Actividad 10: Configuración del sistema para la recepción y almacenamiento de datos. Se configurará y verificará que el sistema esté enviando y recibiendo datos correctamente, asegurando la comunicación efectiva con la nube, aunque se utilicen datos no reales inicialmente.

3.2.3. Fase 3: Implementación y pruebas.

En esta fase, se implementa el sistema completo, verificando la ausencia de errores y presentando los resultados obtenidos.

Actividad 11: Establecimiento de la conexión entre los dispositivos de monitoreo y el sistema IoT. Se integrarán los dispositivos de medición al sistema de comunicación, com-

pletando así la red necesaria para monitorear la estructura y verificando que la información enviada sea precisa.

Actividad 12: Procedimientos para la calibración de los sensores utilizados en el monitoreo del puente. Se calibrarán los sensores encargados de enviar los datos desde la estructura para asegurar valores consistentes y evitar problemas durante la implementación.

Actividad 13: Identificación de áreas de mejora y corrección de errores. Se estimarán posibles fallos en el sistema durante la implementación y se analizarán métodos para una implementación rápida y efectiva en la estructura.

Actividad 14: Implementación del sistema en el puente. Se instalará el sistema en el puente para observar y recopilar datos de la estructura, verificando el correcto funcionamiento y la comunicación continua con la red.

Actividad 15: Recopilación de datos de monitoreo directamente desde la estructura. El sistema deberá funcionar continuamente, recopilando datos que se almacenarán para su posterior análisis y observación durante el tiempo de funcionamiento.

Actividad 16: Desarrollo de métodos para la presentación gráfica de los datos recopilados. Se presentarán los datos recopilados de manera gráfica, facilitando su comprensión y la visualización de los cambios en la estructura de forma remota y práctica.

Actividad 17: Preparación y redacción del informe final del proyecto, incluyendo todos los aspectos y resultados obtenidos. Se redactará el informe final del proyecto, integrando la documentación, gráficos obtenidos y resultados, con sus respectivas conclusiones, destacando aspectos que puedan mejorarse en futuros proyectos.

3.3. Metodología para la selección de dispositivos

Para la selección de componentes se realiza la debida investigación de mercado buscando opciones viables y accesibles basándose en los siguientes criterios.

- **Precisión:** Se analizan las especificaciones técnicas de cada sensor para garantizar mediciones confiables.
- **Compatibilidad:** Se seleccionan equipos con interfaces compatibles entre sí para facilitar la interconexión y comunicación.
- **Resistencia a condiciones ambientales:** Se verifica que los dispositivos sean adecuados para operar en entornos con variaciones de temperatura, humedad y vibraciones.
- **Disponibilidad y costo:** Se consideran opciones comerciales viables en términos de disponibilidad y costo de adquisición.

En algunos dispositivos, además de los criterios para la selección, se toma en consideración factores como que ya se ha realizado trabajos previos, generando un entorno ya conocido y confiable.

Se hace énfasis en el tema de confiabilidad, por lo que en algunos casos el renombre de la marca influye en la decisión de la selección, siendo que esta sea conocida y usada en otros campos, por lo que ya ha presentado buenos resultados.

También se considera dispositivos ya adquiridos con la finalidad de no generar costos excesivos e innecesarios.

CAPÍTULO 4: RESULTADOS

Este capítulo presenta el diseño y desarrollo de un sistema IoT para el monitoreo de estructuras sujetas a cargas dinámicas, destacando la selección crítica de dispositivos necesarios para la transmisión efectiva de datos. Para captar las oscilaciones estructurales, se utilizan sensores conectados a un microcontrolador, que procesa y caracteriza las señales recibidas. A través de un conversor, los datos en formato TTL son enviados hacia una red LoRaWAN, lo que permite una transmisión robusta y de largo alcance hacia la base de recepción. En este punto, la información es transmitida al servidor TTN y, posteriormente, procesada mediante un puente inspirado en [47], que permite su envío a Firebase, donde los datos pueden ser gestionados con mayor facilidad. Este flujo de datos es fundamental para la integridad del sistema, ya que permite monitorear y analizar en tiempo real las condiciones dinámicas de la estructura. Finalmente, mediante un *script* en Python, los datos recibidos son caracterizados y presentados, brindando una visualización detallada de las respuestas estructurales, esenciales para la evaluación y toma de decisiones en ingeniería estructural.

4.1. Arquitectura del Sistema de Monitoreo

En la Figura 4.1 se presenta la arquitectura del sistema propuesto, desarrollado con base en la revisión literaria, buscando el mejor proceso para obtener los resultados deseados. En esta sección se detallan los componentes que se utilizan para el desarrollo del sistema de monitoreo, detallando las características principales, mismas que son capaces de cumplir con las necesidades del sistema.

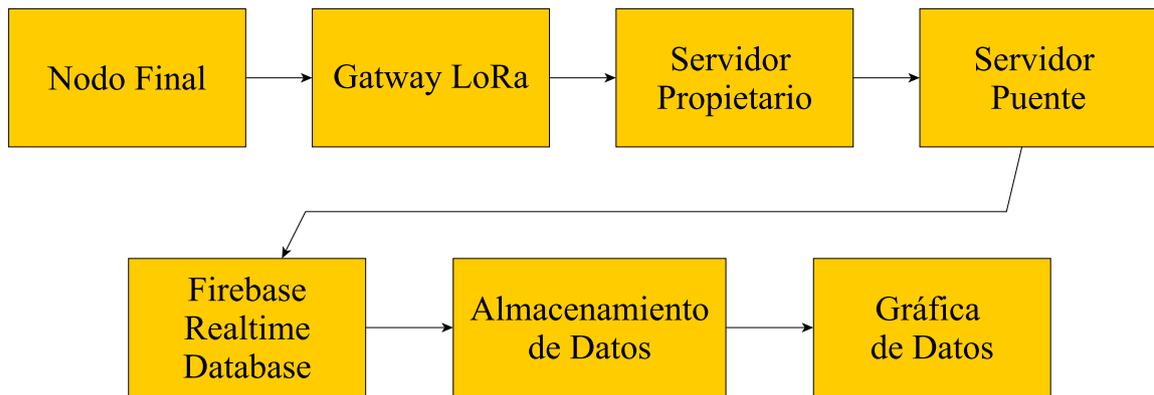


Fig. 4.1. Arquitectura del sistema de monitoreo.

4.1.1. Nodo Final

4.1.1.1. WT901C-TTL

El sensor WT901C-TTL de WitMotion [48] es seleccionado mediante el método explicado en la Sección 3.3 destacando por su precisión y variedad de usos en los que ha sido aplicado, también por el renombre de la marca y accesibilidad en el mercado, siendo este un dispositivo que combina un acelerómetro, giroscopio y magnetómetro en los tres ejes, lo cual proporciona un conjunto completo de datos sobre aceleración, orientación y posición. La capacidad del acelerómetro, en particular, es crítica, ya que permite detectar cambios finos en el movimiento y vibraciones, ofreciendo datos esenciales sobre las oscilaciones que pueden indicar posibles desgastes o tensiones en la estructura. En la Figura 4.2 se presenta el sensor y en la Tabla 4.1 las especificaciones del sensor.



Fig. 4.2. WT901C-TTL [48].

Tabla 4.1. Especificaciones de WT901C-TTL [48].

Especificaciones	
Chip	ICM-42605 + MMC3630
Voltaje	5–36 V
Corriente	<25 mA
Interfaz	Serial TTL
Salida	3-axis acc+gyro+angle+mag+quaternion
Rango del giroscopio	$\pm 250/500/1000/2000^\circ/\text{s}$ (opcional)
Rango del acelerómetro	$\pm 2/4/8/16$ g
Rango de ángulo	Ejes X, Z: $\pm 180^\circ$, Eje Y: $\pm 90^\circ$
Precisión	X, Y estático: $0,05^\circ$; dinámico: $0,1^\circ$; Eje Z: 1°
Frecuencia	0,2–200 Hz (por defecto 10 Hz)
Velocidad de transmisión	2400–921600

De acuerdo con las características presentadas, el sensor responde a la capacidad de capturar información de estructuras sujetas a carga dinámica, reflejando así que la decisión de adquirirlo es la acertada. Además, este sensor ofrece una salida de datos en TTL (Transistor-Transistor Logic), lo que facilita su integración con sistemas de comunicación inalámbrica

como LoRaWAN mediante la capa física, permitiendo una comunicación eficiente en ambientes ruidosos y robustos.

Se requiere comunicar con LoRa. Debido a que se va a trabajar con una red LoRaWAN y con la finalidad de no limitarse a dispositivos que tengan integrada la capa física de LoRa, se exploran métodos para convertir la señal y transmitirla por la capa LoRa.

4.1.1.2. Conversor RS485BL de Dragino

El RS485-BL de Dragino es un convertidor diseñado para permitir la comunicación entre dispositivos RS485/UART y redes LoRaWAN. Este modelo, con grado de protección IP67 resistente al agua y una batería de larga duración de 8500 mAh Li-SOCI2, es ideal para aplicaciones de recolección de datos en entornos exigentes. Su doble modo de lectura ($AT+MOD=1$ y $AT+MOD=2$) permite conectar sensores RS485-MODBUS a través de pines A/B o sensores TTL mediante los pines TXD/RXD/GND, otorgando gran versatilidad. En la Figura 4.3 se muestran los pines que tiene el RS485-BL [25].

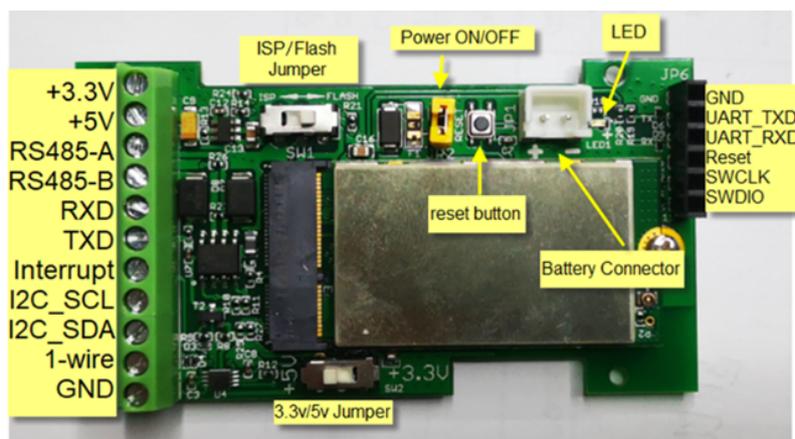


Fig. 4.3. Mapeo de pines del RS 485 BL de Dragino [44]

La razón principal para elegir este dispositivo es su capacidad de habilitar una capa física de comunicación LoRaWAN. Esto permite una integración eficiente de múltiples sensores

en una red de largo alcance y bajo consumo, incluso si no son dispositivos nativos LoRa, ampliando así las posibilidades de monitoreo y adquisición de datos sin necesidad de limitarse a dispositivos específicos de LoRa. Adicionalmente, este equipo ya ha sido adquirido para un trabajo previo, dejando su aplicación idónea para este proyecto.

4.1.1.3. Funcionamiento del Nodo

En la Figura 4.4 se representa el funcionamiento del nodo.

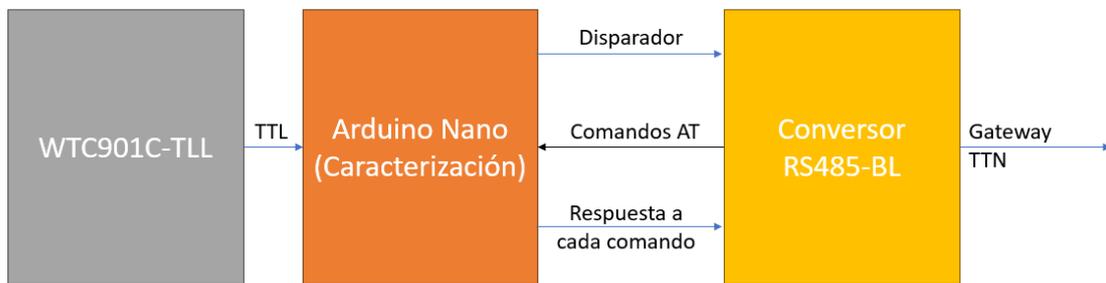


Fig. 4.4. Funcionamiento del Nodo Final

El sensor WT901C-TTL se comunica con el microcontrolador, el cual abre una ventana de tiempo para recolectar datos con una frecuencia de muestreo. Una vez termina el tiempo de recolección, el microcontrolador caracteriza los datos y envía un pulso de activación en el pin Interupt del RS485 BL, ver en la Figura 4.3, el cual fuerza la solicitud de envío, haciendo que el dispositivo pase de estado hibernando a estado activo y enviando una serie de comandos AT hacia el microcontrolador, el cual en respuesta envía los datos específicos resultado de la caracterización, según el orden de llegada de las solicitudes.

En la Tabla 4.2 se muestran los parámetros con los que se configura el microcontrolador para realizar el proceso de transmisión y recepción.

Tabla 4.2. Configuración del microcontrolador

Configuración del Microcontrolador	
Tiempo de muestreo	100 ms
Intervalo de envío (ventana)	15000 ms - 15 s
Disparador	Pin 11
Umbral	Ajustable a la estructura (microcontrolador)
Serial 1 9600 baudios	Pines por defecto
Serial 2 9600 baudios	Pines 2,3

El tiempo de muestreo de 100 ms y la ventana de 15000 ms, son tiempos considerados prudentes luego de varias pruebas de transmisión con la finalidad de encontrar los valores más aptos para reducir el tiempo de envío, adicionalmente se considera el *payload* que es una limitante a la hora de enviar grandes cantidades de datos por redes LoRaWAN, mostrando una limitación de 250 bytes de acuerdo con el trabajo de [28], para lo cual también es importante caracterizar los datos con la finalidad de no perder información.

El proceso de comunicación entre el microcontrolador y el RS485-BL se lo realiza mediante dos seriales, uno por defecto integrado en el microcontrolador y otro simulado mediante librerías con los pines (2,3) de este modo se asegura una comunicación en ambas direcciones y sin presentar problemas.

El modo de trabajo es maestro-esclavo con activación por pulso, el maestro es el RS485-BL, el microcontrolador resulta como esclavo, sin embargo, es quien da el pulso para iniciar el proceso de comunicación, de esta manera se asegura que no se pierda información y solo se transmita cuando ya esté completamente caracterizado.

4.1.1.4. Caracterización

Para llevar a cabo la caracterización de los datos, se ha elegido un Arduino Nano como la plataforma principal. Esta elección se debe a su facilidad de uso, amplia disponibilidad en el mercado y bajo costo, que se ajusta perfectamente a este proyecto, ya que no se necesita una gran capacidad de procesamiento. El objetivo de esta caracterización es analizar los datos de aceleración obtenidos mediante la librería de WitMotion, con el fin de extraer características representativas que permitan evaluar el comportamiento de la señal a lo largo del tiempo.

Se define una ventana de análisis de 15 segundos, durante los cuales se recopilan los datos de aceleración con una frecuencia de muestreo de 100 milisegundos. Esta frecuencia asegura que se capturen detalles suficientes de la señal para un análisis adecuado, sin sobrecargar la memoria del Arduino. Al finalizar cada ventana de muestreo, el código realiza cálculos y extrae métricas importantes, tales como:

- Número de picos detectados que superen un umbral predefinido.
- Pico máximo registrado en la ventana.
- Suma acumulada de las lecturas, que puede ayudar a observar tendencias generales en la señal.
- Tiempo de actividad en el cual la señal supera el umbral, indicando momentos de alta actividad o impacto.
- Derivadas máxima, positiva y negativa, que ofrecen información sobre la aceleración y desaceleración extremas.
- Integral acumulada como medida de desplazamiento.

- Valor RMS (Root Mean Square), para evaluar la magnitud promedio de la señal.

En la Figura **4.5** se muestra el diagrama del funcionamiento del programa que está implementado en el microcontrolador, mismo que es encargado de recopilar los datos, caracterizarlos y enviar la respuesta a los comandos AT.

El programa inicia configurando la comunicación serial y estableciendo una ventana de análisis de 15 segundos, que equivale a un arreglo de lecturas (readings) de tamaño proporcional al número de muestras obtenidas en ese periodo.

En cada iteración del loop, se captura una lectura de aceleración en el eje X del sensor WitMotion y se almacena en el arreglo readings. Cada 100 ms se llena un índice del arreglo hasta completarlo, tras lo cual el índice se reinicia para comenzar a procesar la ventana de datos.

Cuando el arreglo readings está completo, se llama a funciones auxiliares que se muestran en la Tabla **4.3** las cuales analizan los datos en la ventana establecida, cumpliendo el proceso de caracterización.

Tabla 4.3. Funciones encargadas de la caracterización.

	Funciones
detectarpicos()	Identifica los picos de la señal que superen un valor de umbral y calcula el pico máximo.
calcularSumaLecturas()	Suma todas las lecturas de la ventana, útil para observar la tendencia general de la señal.
detectarTiempoActividad()	Determina el tiempo total en que la señal estuvo por encima del umbral.
calcularDerivada()	Calcula la derivada de cada punto para obtener las derivadas máxima, positiva y negativa, lo cual es útil para observar cambios bruscos.
calcularIntegral()	Calcula la integral de la señal a lo largo de la ventana, dando una idea del desplazamiento o acumulación de la señal.
calcularRMS()	Calcula el RMS, que proporciona una medida de la magnitud promedio de la señal.

Los resultados de cada ventana se envían a través del puerto serial 2, donde cada característica puede ser consultada mediante comandos AT específicos. Esto permite que un dispositivo externo reciba y almacene estos datos para un análisis posterior.

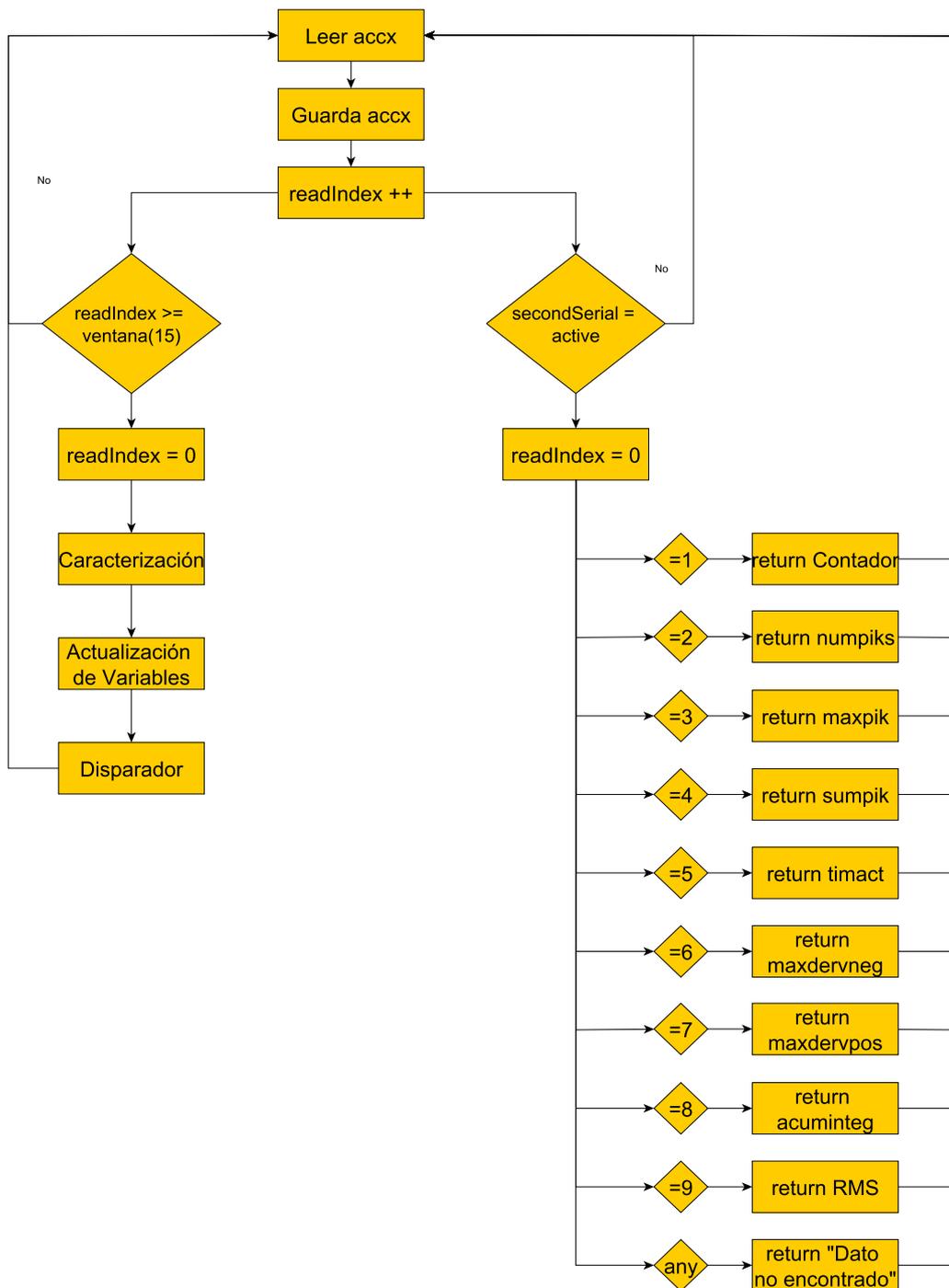


Fig. 4.5. Diagrama del funcionamiento del programa para la caracterización de los datos y respuesta.

4.1.1.5. Comandos AT

Son instrucciones de texto utilizadas para configurar y controlar el módulo [49]. El módulo RS485BL puede operar de forma autónoma o configurarse mediante comandos AT enviados

a través de una interfaz serie. Estos comandos permiten ajustar parámetros, consultar el estado del dispositivo, o enviar datos de comunicación.

En la Tabla 4.4 se muestran los comandos AT utilizados para configurar el RS485-BL mediante un conversor TTL a USB, con la ayuda de una terminal serial. El resto de comandos se los deja por defecto.

Tabla 4.4. Comandos AT utilizados para la configuración.

Comandos AT	
ATZ	Reset MCU
AT+CFG	Show all configures
AT+APPEUI=?	Get the Application EUI
AT+APPKEY=?	Get the Application Key
AT+DEUI=?	Get the Device EUI.

De este modo se configura el medio de comunicación y los comandos a modo de instrucciones que serán enviados al microcontrolador.

En la Tabla 4.5 se muestran la configuración de los comandos que enviará el maestro al esclavo.

Tabla 4.5. Configuración de Comandos

Configuración de los comandos AT para la solicitud.	
AT+COMMAND1=31 ,0	AT+SEARCH1=0,0
AT+DATAACUT1=8,2,1 8	AT+CMDDL1=0
AT+COMMAND2=32 ,0	AT+SEARCH2=0,0
AT+DATAACUT2=8,2,1 8	AT+CMDDL2=0
AT+COMMAND3=33 ,0	AT+SEARCH3=0,0
AT+DATAACUT3=8,2,1 8	AT+CMDDL3=0
AT+COMMAND4=34 ,0	AT+SEARCH4=0,0
AT+DATAACUT4=8,2,1 8	AT+CMDDL4=0
AT+COMMAND5=35 ,0	AT+SEARCH5=0,0
AT+DATAACUT5=8,2,1 8	AT+CMDDL5=0
AT+COMMAND6=36 ,0	AT+SEARCH6=0,0
AT+DATAACUT6=8,2,1 8	AT+CMDDL6=0
AT+COMMAND7=37 ,0	AT+SEARCH7=0,0
AT+DATAACUT7=8,2,1 8	AT+CMDDL7=0
AT+COMMAND8=38 ,0	AT+SEARCH8=0,0
AT+DATAACUT8=8,2,1 8	AT+CMDDL8=0
AT+COMMAND9=39 ,0	AT+SEARCH9=0,0
AT+DATAACUT9=8,2,1 8	AT+CMDDL9=0

4.1.2. Gateway LoRa

El Gateway wAP LR9 es una puerta de enlace para la comunicación con tecnologías LoRa a una frecuencia entre 902 y 928 MHz. Siendo un punto de acceso inalámbrico resistente a la intemperie con IP54 [50]. Conformando el punto de conexión con los diferentes dispositivos, implementando el protocolo para la transmisión de datos hacia el destinatario, completando el proceso de comunicación LoRaWAN. En la Figura 4.6 se muestra el dispositivo.



Fig. 4.6. wAP LR9 [50].

La adquisición de este dispositivo se basa que es principalmente *outdoor*, permitiendo llevarlo al exterior, a demás del renombre de la marca y los trabajos previos que se ha realizado con los dispositivos de *Mikrotik*, mismos que han presentado gran confiabilidad. Adicionalmente, se puede considerar Antenna kit for LoRa, la cual puede aprovechar de mejor manera las características del dispositivo, complementando la funcionalidad, completando la parte física para el funcionamiento de la red LoRaWAN. En la Figura 4.7 se muestran las características de la antena del kit, adicionalmente en la Figura 4.8 se presenta lo el resto de componentes del kit.

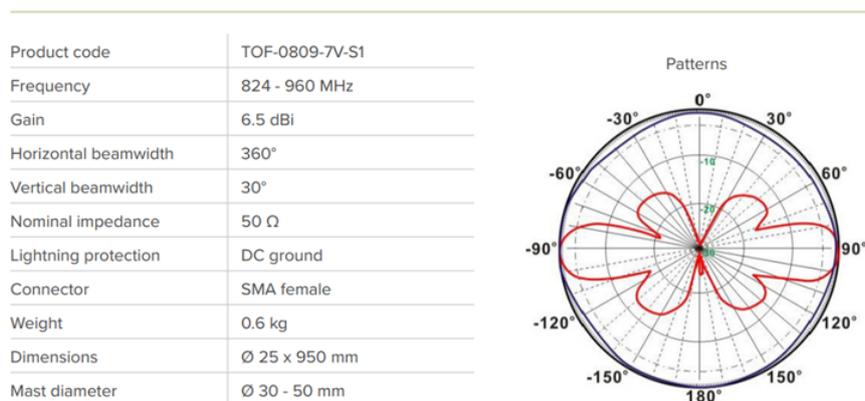


Fig. 4.7. Características de la antena [50].

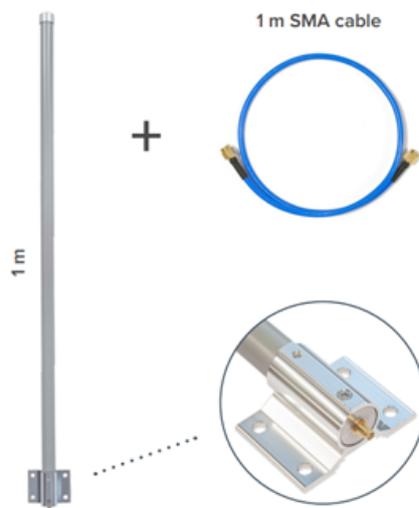


Fig. 4.8. Antena para el wAP LR9 [50].

La selección del wAP LR9 se basa en su capacidad para trabajar con largas distancias, y sus condiciones de resistencia son adecuadas para el entorno en el que se va a trabajar. El proceso de configuración es el mismo que se presenta en el manual de usuario [51], dejando una conexión ad hoc.

En la Tabla 4.6 se presentan los puntos más importantes a considerar al momento de configurar el Gateway.

Tabla 4.6. Especificaciones del Gateway.

Funciones	
Status	Enable
Name	MikrotikGuayPiedras
Gateway ID	eui-5031395362754750
Firmware ID	cf1b71f
Network Servers	TTN nam1 920 EU
Channel plan	US 915 Sub2
Antenna Gain	0
Network	Public
Band	902-928
Wireless	
Frequency	auto
Band	2GHz-B/G/N
Channel Width	20/40MHzXX
Country	etsi

4.1.3. Servidor Propietario

Como servidor propietario se usa a The Things Network, debido a que es una red pública, global y colaborativa basada en el protocolo LoRaWAN, diseñada para conectar dispositivos IoT a Internet de manera eficiente, segura y de largo alcance, con un enfoque en el bajo consumo de energía, además del uso de *webhooks* para la comunicación con servidores externos [34].

En este entorno se realiza el registro y autenticación de los dispositivos de la red LoRaWAN, tanto como el gateway, como el nodo final, mismo que para registrarlo se tiene que crear una nueva aplicación en donde se estaría desarrollando el entorno y hacer uso de las *webhooks* al transmitir los datos desde el servidor propietario todo esto es necesario para

llevar a cabo el funcionamiento del sistema IoT.

4.1.3.1. Gateway

El proceso de registro es simple e intuitivo siguiendo los pasos que muestra en la misma página web de TTN.

En la Tabla 4.7 se muestran las configuraciones generales del dispositivo.

Tabla 4.7. Especificaciones del Gateway en TTN.

Información General	
Gateway ID	eui-5031395362754750
Frequency plan	United States 902-928 MHz, FSB 2 (used by TTN)
Require authenticated connection	Disabled
Public status	Enabled
Public location	Enabled
Packet Broker forwarding	Enabled
Status location updates	Disabled
Enforce duty cycle	Enabled

4.1.3.2. Aplicación

Del mismo modo se registra en el apartado de aplicaciones en dispositivo encargado de enviar los datos al RS485-BL. En la Tabla 4.8 se muestra la configuración general del dispositivo.

Tabla 4.8. Especificaciones del RS485-BL en TTN.

Información General	
End device ID	eui-a8404127e1874019
Frequency plan	United States 902-928 MHz, FSB 2 (used by TTN)
LoRaWAN version	LoRaWAN Specification 1.0.3
Regional Parameters version	RP001 Regional Parameters 1.0.3 revision A
Created at	Oct 6, 2023 15:14:11

4.1.4. Servidor Puente

Basándose en el trabajo de [47] en el cual se realiza un servidor puente en el que conecta TTN con Firebase. De manera general el proceso que realiza es tomar los datos de TTN en un archivo JSON, mediante un servidor instalado en una máquina virtual con la ayuda de API Compute Engine de Google Cloud, la imagen del disco utilizada es Ubuntu 20.04. Una vez obtenido el archivo de TTN se lo decodifica y extrae las características necesarias con la finalidad de que no sean un proceso repetitivo para lo cual se guarda en una base de datos de MYSQL, un *script* de Python realiza la gestión de los datos viejos y nuevos para enviarlos a Firebase Realtime Database.

4.1.5. Firebase

Es una plataforma de desarrollo de aplicaciones de Google que proporciona herramientas y servicios back-end en la nube para simplificar y acelerar la creación de aplicaciones web y móviles. Su arquitectura permite sincronizar datos en tiempo real entre dispositivos, facilitando el desarrollo de aplicaciones que requieren interacción en vivo.

A pesar de que la plataforma trabaja en tiempo real, en este sistema no se aplica tal concepto, sin embargo, se usa la aplicación para transmitir a los dispositivos, siendo un

entorno muy útil al no perder mayor tiempo en el envío de datos.

En la Tabla 4.9 se muestra las características que presenta Realtime Database con su plan Free.

Tabla 4.9. Características de Firebase Realtime Database.

Aspecto	Límite en el plan gratuito
Cantidad de conexiones simultáneas	Hasta 100 conexiones simultáneas.
Tamaño máximo de datos	1 GB para el almacenamiento total de la base de datos.
Ancho de banda	50 MB/día de descarga (lectura de datos).
Operaciones de escritura	No tiene un límite explícito, pero debe estar dentro del ancho de banda y restricciones de escritura/lectura.
Tamaño de un nodo (dato individual)	256 kB máximo por dato individual.
Reglas de seguridad	Puede utilizar reglas de seguridad, pero el tiempo de simulaciones/pruebas está limitado a 30 días.
Instancias de base de datos	Una sola instancia por proyecto.
Zonas de disponibilidad	Solo disponible en la región global (us-central1).
Soporte	Comunidad y documentación oficial; sin soporte técnico directo.

Las características presentadas son las necesarias para el desarrollo del sistema, por lo que se desarrolla el resto del sistema desde Firebase.

4.1.6. Almacenamiento de Datos

El programa es una aplicación desarrollada en Python que integra Firebase Realtime Database con una base de datos local SQLite para gestionar datos relacionados con oscilaciones. El propósito principal es recibir datos desde Firebase, procesarlos, almacenarlos localmente y registrar información clave, como el valor máximo detectado.

El programa comienza configurando una conexión a una base de datos SQLite. Si la base de datos no existe, se crea automáticamente. Dentro de SQLite, se define una tabla llamada *datos_oscilaciones* que incluye columnas para registrar diferentes métricas relacionadas con las oscilaciones, como NumPic, PicMax, SumaDatos, y más. Esta estructura asegura que los datos sean persistentes y fácilmente accesibles para análisis posterior.

La función *update_data* se encarga de recuperar los datos de Firebase desde un nodo específico llamado OscilacionesFake. Esta función asigna valores a variables globales, asegurándose de utilizar un valor por defecto (0) si algún dato está ausente en Firebase. Entre los datos recuperados se incluyen métricas como *NumPic*, *PicMax*, *MaxDerNeg* y *RMS*. Adicionalmente, se consulta un nodo separado llamado *PicMaxRegis* para obtener el registro histórico del pico máximo (*maxpicRegis*).

Para garantizar la persistencia de los datos, se implementa la función *saveData*. Está inserta los valores actuales de las métricas, junto con una marca de tiempo generada dinámicamente, en la tabla *datos_oscilaciones* de SQLite. Esto permite mantener un registro local de todas las actualizaciones provenientes de Firebase.

En la Figura 4.9 se muestra el funcionamiento del programa.

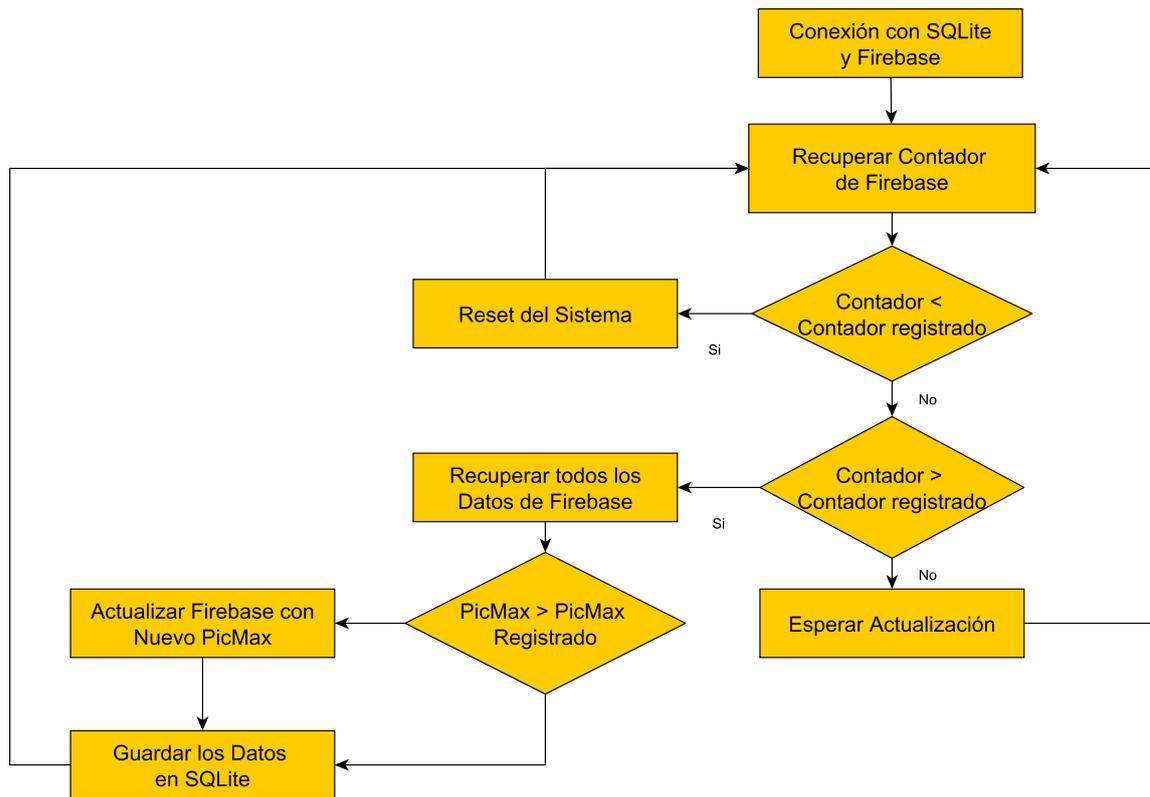


Fig. 4.9. Diagrama de flujo del programa de recepción y almacenamiento

El almacenamiento local reduce la cantidad de solicitudes que se realizan hacia Firebase al momento de utilizar los datos, dejando a disposición para su uso en cualquier momento.

4.1.7. Gráfica de Datos

Se desarrolla una interfaz en la que se representan gráficamente los datos tal como se puede observar en la Figura 4.10.

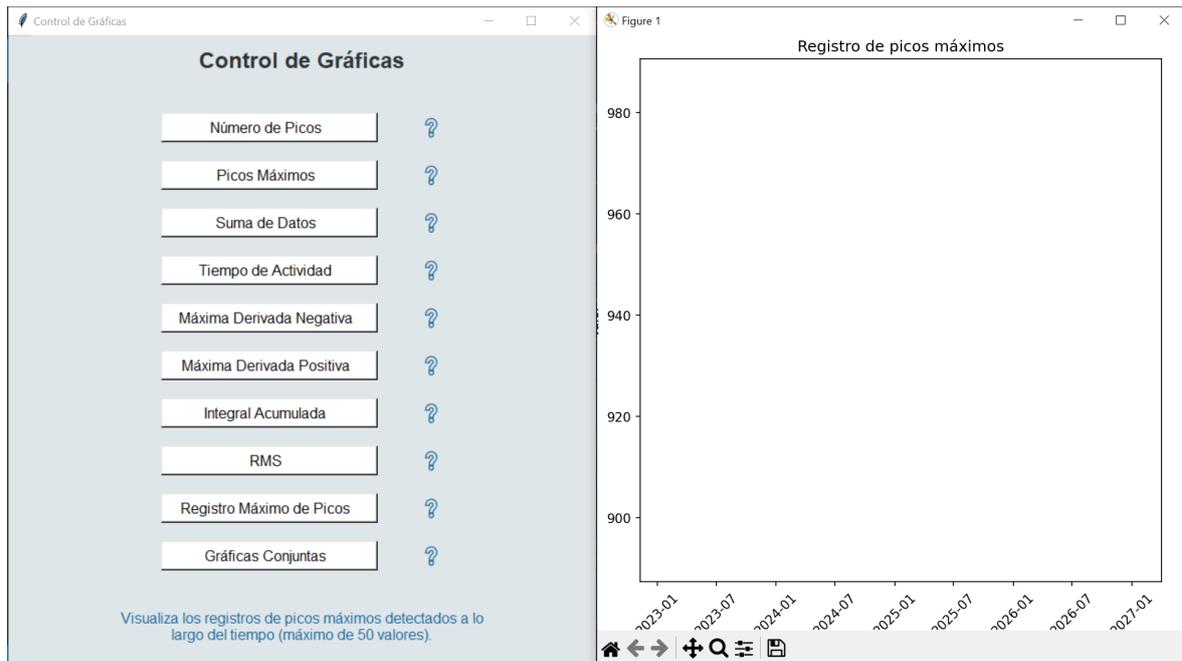


Fig. 4.10. Interfaz para visualizar los datos recibidos.

Con la ayuda de *Tkinter*, una librería de Python, se crea en el programa principal una ventana gráfica, esta sirve como panel de control para abrir y cerrar *scripts* de gráficos de forma independiente. La funcionalidad principal está organizada en torno a una interfaz gráfica que proporciona botones, cada uno de los cuales abre un gráfico en un subproceso independiente, también hay un entorno de ayuda para saber que es lo que realiza cada botón. Al estar ejecutándose el programa hay otro subproceso dedicado a la recepción de datos desde Firebase. Este diseño permite la ejecución simultánea de gráficos y la recepción continua de datos.

Se utiliza el módulo *subprocess* para abrir *scripts* Python como subprocesos, lo que permite que cada gráfico se ejecute en su propia ventana. Estos subprocesos son gestionados para asegurarse de que no se abran duplicados. Si un proceso ya está ejecutándose, el botón correspondiente no abre un nuevo proceso.

Se crea una ventana principal que contiene botones organizados en una cuadrícula. Cada

botón está asociado a un *script* gráfico y utiliza un identificador único para gestionar su subproceso. Al hacer clic en un botón, el *script* correspondiente se ejecuta y muestra un gráfico animado.

Cuando se cierra la ventana principal, todos los subprocesos abiertos se terminan automáticamente para evitar que queden procesos huérfanos.

Se ejecuta automáticamente un *script* llamado *repcionV21.py*, que ya está explicado en la sección 4.1.6 Almacenamiento de Datos. Este subproceso garantiza que los datos de Firebase se reciban y almacenen en una base de datos SQLite.

Cada gráfico está diseñado como un *script* independiente. Aunque el contenido varía según los datos que se visualizan, el funcionamiento de cada programa que es llamado para graficar los datos almacenados en SQLite funciona de la siguiente manera.

Los *scripts* se conectan a la base de datos local *datos_oscilaciones.db* para recuperar los datos necesarios.

Una función llamada *fetch_data* realiza una consulta SQL para obtener las últimas 50 entradas de la tabla correspondiente, esto con la finalidad de tener una correcta visualización de la información. Los datos se procesan para extraer las fechas y los valores relevantes, que se invierten para mostrarse en orden cronológico.

Utilizando la librería de Python Matplotlib, se crea una gráfica que se actualiza en cada iteración. La función de actualización (*update*) consulta la base de datos y redibuja la gráfica cada segundo.

En la Figura 4.11 se muestra el diagrama para poder entender de mejor manera el proceso que lleva graficar los datos.

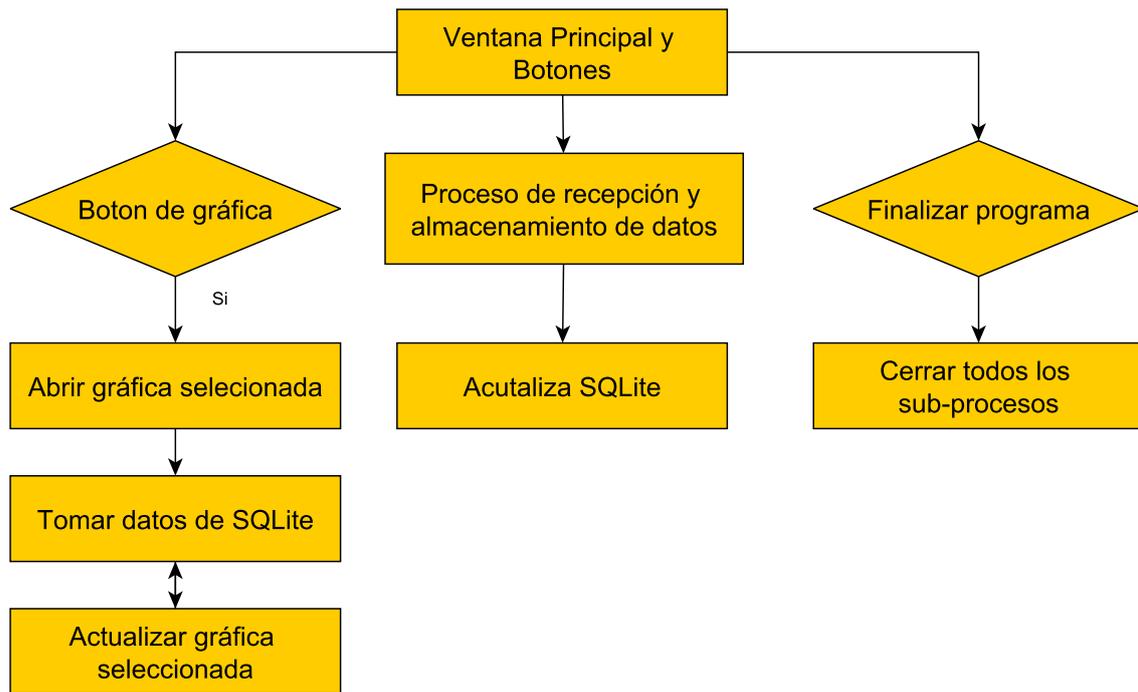


Fig. 4.11. Diagrama del programa para graficar los datos.

Entre las diferentes gráficas que se pueden mostrar, existe también la opción de mostrar todas las gráficas al mismo tiempo.

4.2. Pruebas de funcionamiento

En este capítulo se presentan las principales pruebas que se realizan para verificar el correcto funcionamiento del sistema, con la finalidad de garantizar que se está cumpliendo todos los requerimientos necesarios para el desarrollo, como son la comunicación a largo alcance, la caracterización de los datos y el correcto proceso de transmisión sin errores de interpretación.

Se desarrollan pruebas y comparaciones con otros sensores para validar que la información está siendo la indicada, correcta y más acertada. De esta manera se tiene un sistema fiable y datos verídicos de lo que está sucediendo en la estructura sujeta a carga dinámica.

4.2.1. Validación de sensores

Se tiene el sensor WT901C-TTL, en el cual se incluye un programa para verificar el funcionamiento de manera gráfica y en todos los ejes que trabaja; sin embargo, se centrará únicamente en lo que se está utilizando.

En la Figura 4.12 se muestra la interfaz del programa donde se pueden interpretar los datos de manera gráfica.

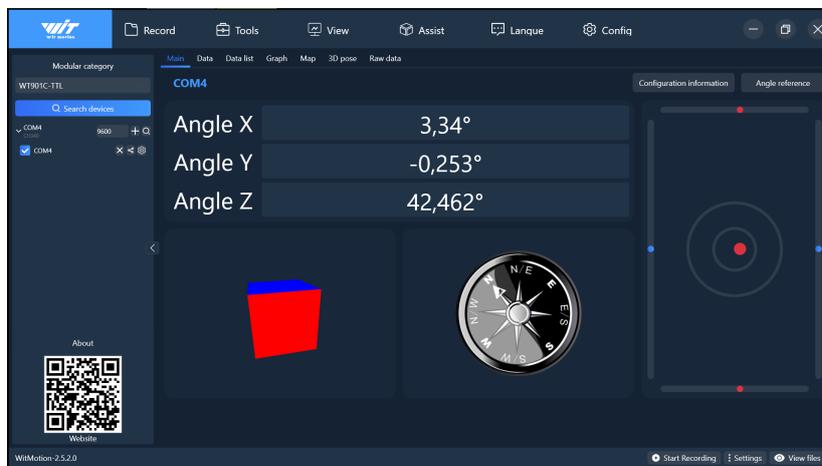


Fig. 4.12. Interfaz del programa que se usa para verificar el funcionamiento del WT901C-TTL.

Haciendo la comparación con otros dispositivos que presentan la misma función de verificar la inclinación, se tiene que al estar ambos en una misma superficie, los resultados similares como se muestra en la Figura 4.13. Adicionalmente, como se muestra en la Figura 4.14, se realiza la toma de datos en diferentes superficies inclinadas en diferentes grados, teniendo como resultado valores similares a los que presentan dichas superficies. Tenido en cuenta lo mencionado, se corrobora que el sensor está calibrado y presenta valores correctos.



Fig. 4.13. En la parte izquierda se tiene la ubicación de los sensores en una misma superficie, siendo necesario para comparar las medidas obtenidas del eje X donde el inclinómetro digital y en el monitor presentan los mismos resultados bajo la misma apreciación.



Fig. 4.14. Proceso de comparación en superficies inclinadas, verificando los datos del inclinómetro digital y los reflejados en la pantalla en el eje X.

4.2.2. Caracterización

Para verificar el proceso de caracterización, los datos se imprimen por dos canales seriales al mismo tiempo. Los datos reales obtenidos directamente del sensor en la ventana de tiempo y los datos caracterizados por el siguiente canal. De este modo, es posible visualizar los datos reales y los posteriores al proceso de caracterización. Una vez obtenidos los datos reales, se comprueba manualmente que el proceso se haya llevado a cabo correctamente y como resultado, se realiza una comprobación manual mediante el proceso de caracterización. Como se muestra en la Figura 4.15, se presentan los datos reales obtenidos del sensor, mismos que se comparan con los datos caracterizados que se muestran en la misma Figura 4.16, y se puede observar que guardan la misma relación entre sí. El código creado se encuentra en <https://bit.ly/OscilacionesCode> donde se puede encontrar el archivo *PruebaComunicacion.ino* con el que se logra verificar que el proceso de caracterización esté siendo el correcto.

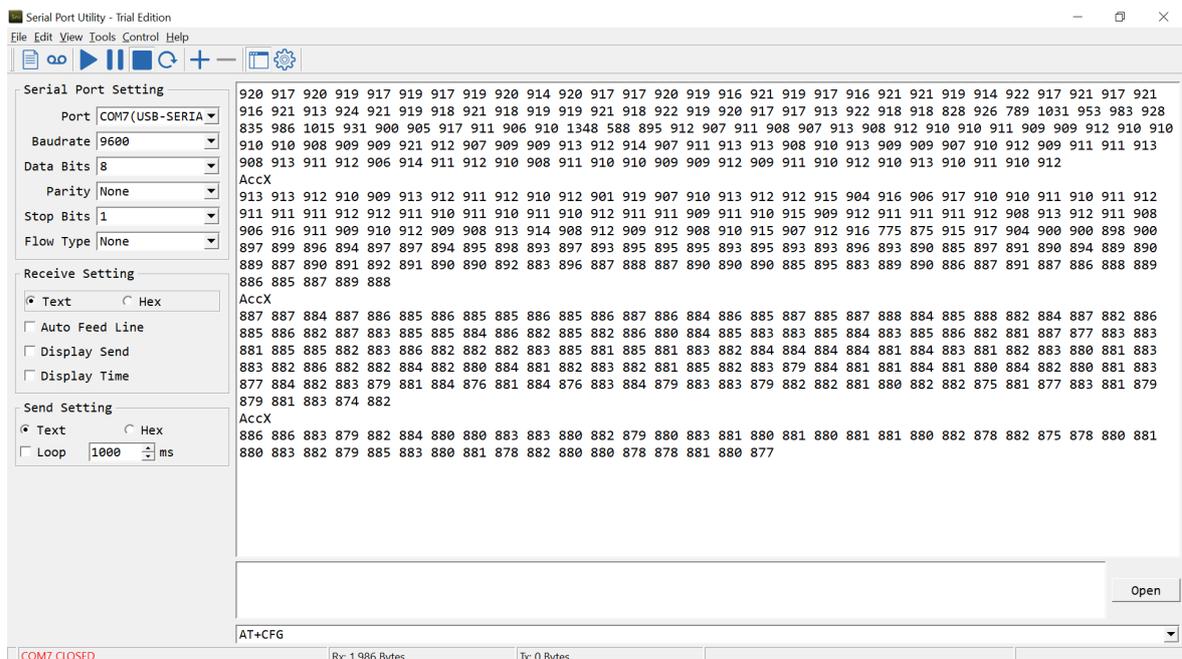


Fig. 4.15. Datos obtenidos directamente del sensor.

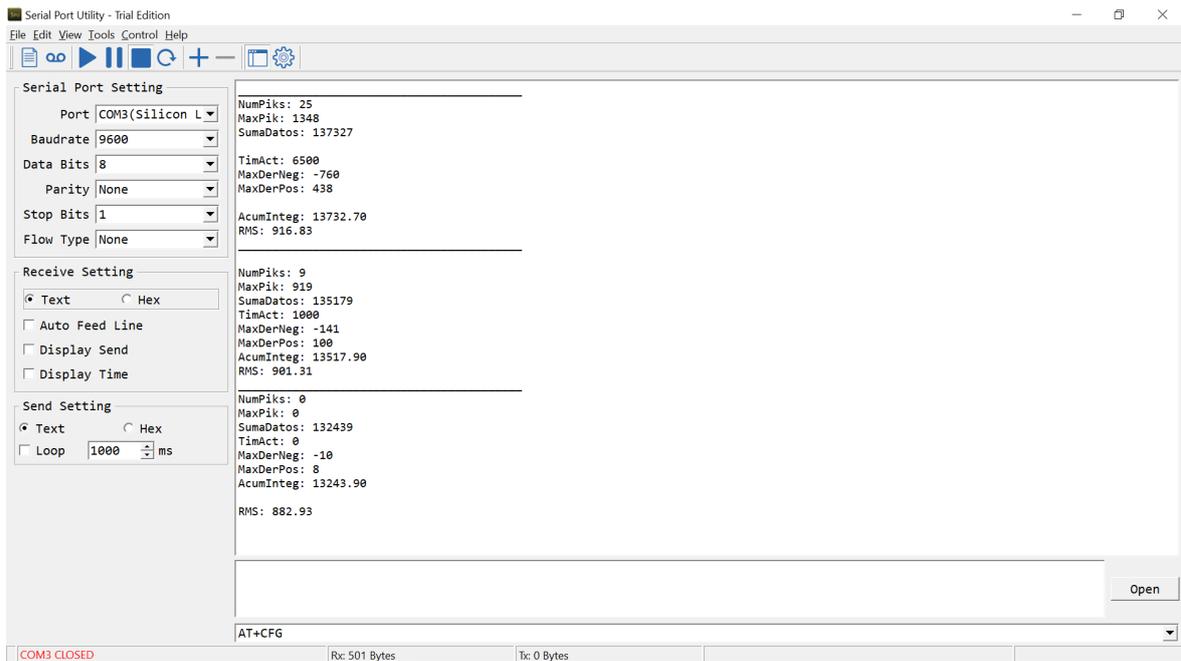


Fig. 4.16. Datos obtenidos posteriores al proceso de caracterización.

Es importante aclarar que los datos presentes no son obtenidos de la estructura, en cambio, se simula de manera manual el comportamiento que se espera obtener.

4.2.3. Recepción de datos en TTN

El convertor RS485-BL al conectarse tiene el registro de su batería, la cual se puede observar en el servidor propietario en cada solicitud de datos; esto quiere decir que si no se tiene ningún dato en los comandos configurados se puede verificar que se tiene comunicación con el servidor al recibir el dato de la batería, como se muestra en la Figura 4.17 en donde se tiene el *payload* con el registro de la batería.

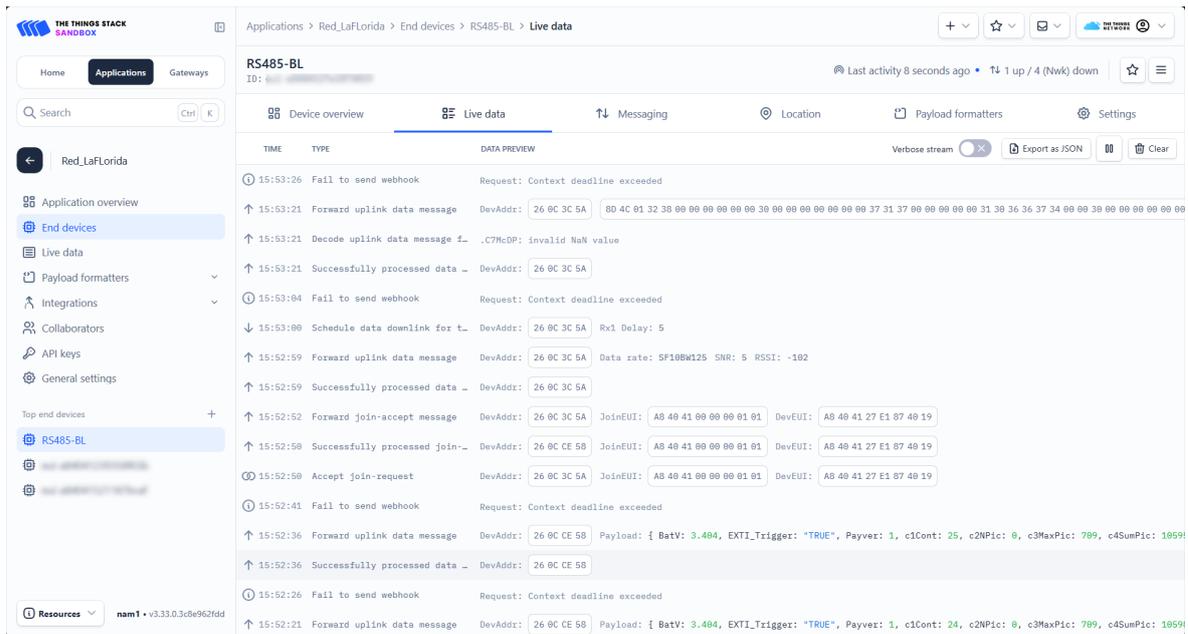


Fig. 4.17. Recepción del *payload*

De esta manera se verifica que se tenga comunicación con el gateway central y el servidor propietario, también se envía un pulso por el disparador para forzar una solicitud.

4.2.4. Recepción de los comandos para la solicitud

Con la ayuda de un lector serial TTL se puede visualizar qué es lo que está transmitiendo el dispositivo. Como se puede ver en la Figura 4.18 los comandos que llegan son los mismos configurados; al enviar un pulso por el disparador, el funcionamiento es el esperado.

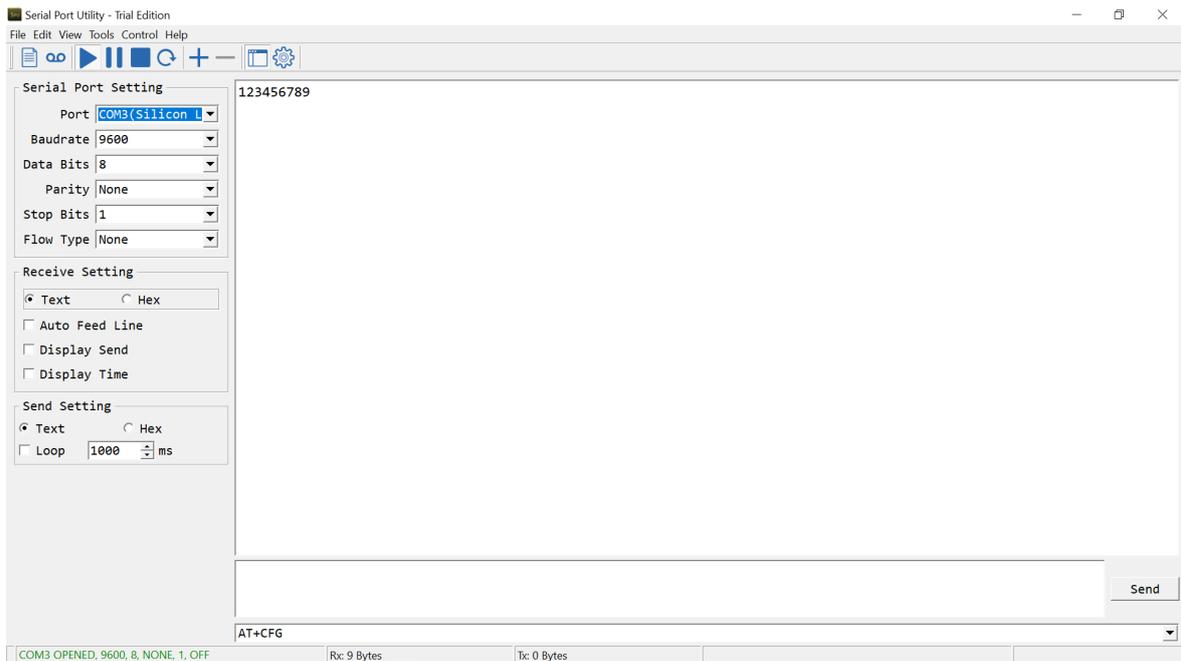


Fig. 4.18. Comandos recibidos desde el RS485-BL

Los comandos están configurados con los números del 1 al 9 a medida que cada número es un comando que espera tener una respuesta, por lo que la solicitud de los comandos funciona de manera correcta, se establece la comunicación con el microcontrolador estableciendo todo el sistema de transmisión. La Figura 4.19 muestra la respuesta a cada comando que está llegando, en el caso real solo envía el valor, pero por fines visuales se presenta que es cada dato enviado.

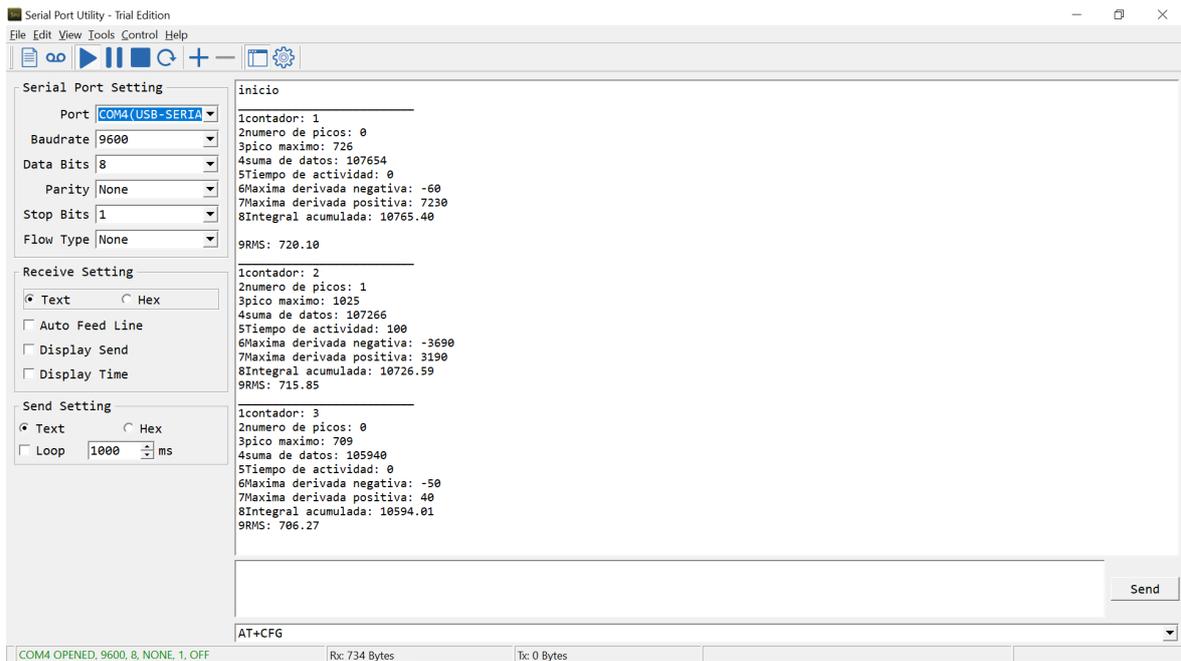


Fig. 4.19. Respuesta del microcontrolador

4.2.5. Envío de datos al servidor propietario

Para terminar de verificar el proceso de transmisión, se tiene en el servidor propietario el *payload*, mismo que al descomponer por partes y transformar los caracteres hexadecimales, se tiene la información completa que se transmitió desde el microcontrolador, posterior a un proceso de caracterización. En la Figura 4.20, se muestra el *payload* que recibe TTN.

4.2.6. Envío de datos al servidor puente

Los datos que llegan al servidor propietario se envía automáticamente mediante *Webhooks* a una IP pública del servidor puente, siendo este el encargado de recibir y almacenar los datos temporalmente, para que mediante un *script* de Python sean enviados y/o tratados de la manera que se considere prudente. Para esta aplicación se toman los datos y se envían a Firebase Realtime Database, para tener una mayor comodidad en el uso de información. Como se puede observar en la Figura 4.22 donde se muestran los datos que han sido enviados y almacenados en el servidor puente, con un tiempo de recepción igual a la ventana, estos datos están listos para ser enviados por el *script* de Python a Firebase Realtime. El proceso completo lo muestra el trabajo en [47], presentando el código y los pasos que se tiene que seguir para el correcto funcionamiento del sistema.

El servidor puente ubicado en la Cruz Roja - Imbabura, tiene conexión directa con el servidor propietario, siendo un punto clave en la implementación, En la Figura 4.23 se puede observar el servidor puente en funcionamiento. En el mismo lugar se encuentra ubicado el Gateway con su respectiva antena de 5 dBi, permitiendo tener un punto de acceso cercano al servidor puente, haciendo que la etapa para realizar pruebas de funcionamiento sea mucho más accesible. En Anexo A se visualiza que el gateway se encuentra implementado en una zona estable y de fácil acceso para los diferentes nodos.

```

ene 29 17:22
xibernetiq@xibernetiq-USS: ~
| 51 | eui-a8404127e1874019 | connectivitytest | 2025-01-29 17:16:08 | 3.387 | 249 | 0 | 671 | 100165 | 0 | -40 | 50 |
10016.5 | 667.77 |
| 52 | eui-a8404127e1874019 | connectivitytest | 2025-01-29 17:16:23 | 3.39 | 250 | 0 | 670 | 100189 | 0 | -30 | 30 |
10018.9 | 667.93 |
| 53 | eui-a8404127e1874019 | connectivitytest | 2025-01-29 17:16:38 | 3.387 | 251 | 0 | 687 | 100207 | 0 | -270 | 190 |
10020.7 | 668.05 |
| 54 | eui-a8404127e1874019 | connectivitytest | 2025-01-29 17:16:53 | 3.387 | 252 | 0 | 675 | 100192 | 0 | -80 | 60 |
10019.2 | 667.95 |
| 55 | eui-a8404127e1874019 | connectivitytest | 2025-01-29 17:17:09 | 3.385 | 253 | 0 | 675 | 100165 | 0 | -90 | 100 |
10016.5 | 667.77 |
| 56 | eui-a8404127e1874019 | connectivitytest | 2025-01-29 17:17:23 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
0 | 0 |
| 57 | eui-a8404127e1874019 | connectivitytest | 2025-01-29 17:17:39 | 3.387 | 255 | 0 | 671 | 100183 | 0 | -40 | 50 |
10018.3 | 667.89 |
| 58 | eui-a8404127e1874019 | connectivitytest | 2025-01-29 17:17:54 | 3.387 | 256 | 0 | 673 | 100181 | 0 | -60 | 50 |
10018.1 | 667.87 |
| 59 | eui-a8404127e1874019 | connectivitytest | 2025-01-29 17:18:09 | 3.387 | 257 | 0 | 677 | 100181 | 0 | -200 | 120 |
10018.1 | 667.88 |
| 60 | eui-a8404127e1874019 | connectivitytest | 2025-01-29 17:18:24 | 3.387 | 258 | 0 | 670 | 100186 | 0 | -30 | 50 |
10018.6 | 667.91 |
| 61 | eui-a8404127e1874019 | connectivitytest | 2025-01-29 17:18:40 | 3.387 | 259 | 0 | 670 | 100195 | 0 | -50 | 60 |
10019.5 | 667.97 |
| 62 | eui-a8404127e1874019 | connectivitytest | 2025-01-29 17:18:55 | 3.39 | 260 | 0 | 670 | 100225 | 0 | -30 | 30 |
10022.5 | 668.17 |
| 63 | eui-a8404127e1874019 | connectivitytest | 2025-01-29 17:19:10 | 3.387 | 261 | 0 | 671 | 100224 | 0 | -40 | 30 |
10022.4 | 668.16 |
| 64 | eui-a8404127e1874019 | connectivitytest | 2025-01-29 17:19:25 | 3.385 | 262 | 0 | 670 | 100186 | 0 | -30 | 30 |
10018.6 | 667.91 |
| 65 | eui-a8404127e1874019 | connectivitytest | 2025-01-29 17:19:40 | 3.387 | 263 | 0 | 671 | 100217 | 0 | -50 | 30 |
10021.7 | 668.11 |
| 66 | eui-a8404127e1874019 | connectivitytest | 2025-01-29 17:19:55 | 3.387 | 264 | 0 | 670 | 100214 | 0 | -20 | 40 |
10021.4 | 668.09 |
| 67 | eui-a8404127e1874019 | connectivitytest | 2025-01-29 17:20:11 | 3.387 | 265 | 0 | 671 | 100194 | 0 | -60 | 60 |
10019.4 | 667.96 |
| 68 | eui-a8404127e1874019 | connectivitytest | 2025-01-29 17:20:26 | 3.387 | 266 | 0 | 678 | 100227 | 0 | -140 | 110 |
10022.7 | 668.18 |
| 69 | eui-a8404127e1874019 | connectivitytest | 2025-01-29 17:20:41 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
0 | 0 |
| 70 | eui-a8404127e1874019 | connectivitytest | 2025-01-29 17:20:56 | 3.387 | 268 | 0 | 760 | 100299 | 0 | -800 | 930 |
10029.9 | 668.7 |
-----+-----+
70 rows in set (0.00 sec)
mysql>

```

Fig. 4.22. Base de datos en MySQL

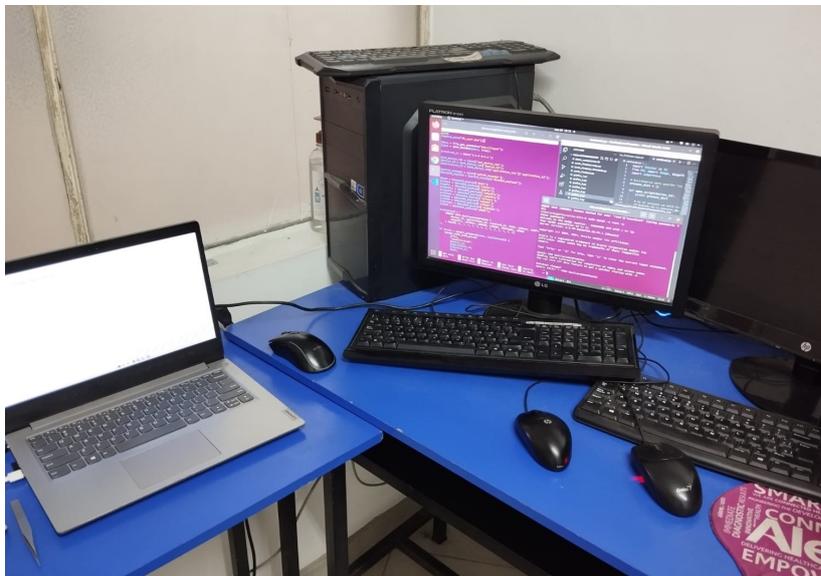


Fig. 4.23. Implementación del servidor puente

Adicionalmente, el servidor puente cuenta con un acceso remoto por VNC server, haciendo que cualquier configuración que se requiera realizar en el servidor se lo haga desde cualquiera de los dispositivos con la cuenta del propietario de VNC server.

4.2.7. Visualización de los datos

En el mismo servidor puente se ejecuta un *script* de Python que recibe la información desde la nube y la almacena localmente en SQLite y presenta de manera gráfica los datos obtenidos desde Firebase Realtime Database. Esto con la finalidad de tener una base de datos sólida y constante, donde no se tenga pérdida de información en ningún momento, debido a que al ser un servidor este no debería apagarse, permitiendo estar siempre activo. De esta manera se aprovechan los recursos que proporciona el servidor puente, sin embargo, el programa es tal que se puede ejecutar simultáneamente desde cualquier dispositivo, para lo que se puede visualizar y guardar los datos de manera local, aunque el registro de datos se lo haga mientras el programa de visualización este en funcionamiento.

En la Figura 4.24 se muestra los datos que están llegando y siendo graficados, en el Anexo B se presenta todos los datos en su correcta visualización, obtenidos por el sistema.

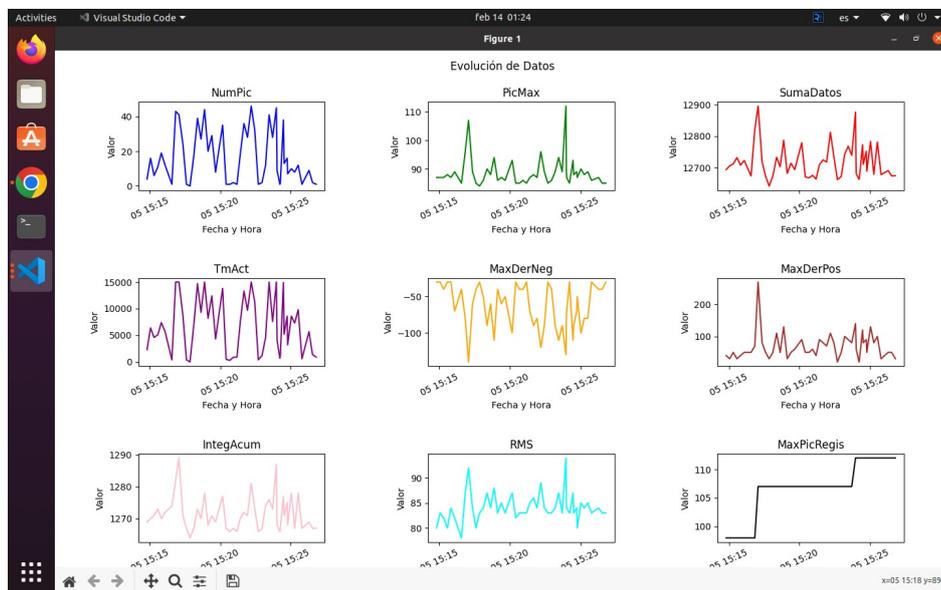


Fig. 4.24. Visualización de los datos obtenidos desde el sistema.

CAPÍTULO 5: CONCLUSIONES Y

RECOMENDACIONES

5.1. Conclusiones

En este trabajo se desarrolló un sistema de monitoreo de oscilaciones en estructuras sujetas a cargas dinámicas, utilizando tecnología IoT para la recolección, almacenamiento y visualización de datos. El sistema diseñado e implementado incluyó un servidor puente que permite la comunicación remota y la adaptabilidad para el tratamiento de datos obtenidos por múltiples sensores, configurables según los parámetros establecidos en el servidor.

Uno de los hallazgos más relevantes fue la identificación de los picos máximos como característica clave para identificar posibles fallas estructurales. El monitoreo continuo demostró que estas características presentan una tendencia a incrementarse con el tiempo, lo que podría indicar un deterioro progresivo en las condiciones estructurales.

La implementación de la red IoT permitió un sistema fluido en diferentes puntos, debido a que se extiende al uso de diferentes bases de datos, lo que permite trabajar al modo en el que mejor convenga de acuerdo al proyecto y aplicación que se quiera realizar. Esta configuración no solo asegura un registro constante de los datos, sino que también facilita el análisis y la consulta en tiempo real desde ubicaciones remotas. Asimismo, la red diseñada es lo suficientemente flexible para conectar sensores adicionales, lo que expande su aplicabilidad y escalabilidad.

El programa de visualización, basado en el servidor puente, asegura que los datos recopilados puedan ser utilizados en tiempo real para evaluar el estado de la estructura. Además, la capacidad de configuración remota reduce significativamente los costos y tiempos asociados

a la implementación y mantenimiento del sistema.

5.2. Recomendaciones

El sistema diseñado destaca por su fácil escalabilidad, ya que no se limita únicamente a los nodos finales implementados. Permite la incorporación de nuevos nodos que enriquezcan la red con datos adicionales, ampliando así las aplicaciones de monitoreo. Esta característica resulta especialmente útil al disponer de múltiples puntos de recolección de datos que pueden ser enviados al servidor propietario para su procesamiento y análisis adecuado.

Sin embargo, debido a su arquitectura compleja, que incluye puntos intermedios, el sistema puede presentar limitaciones en aplicaciones que requieren alertas en tiempo real. Un ejemplo de ello sería un sistema de detección de incendios, donde la rapidez en la emisión de alertas al personal es crítica.

Para superar estas limitaciones, se sugiere implementar un sistema de alerta temprana basada en el análisis de los datos recibidos. Este sistema podría integrarse al actual sistema de monitoreo, maximizando el uso de la red y ofreciendo una solución más versátil. También se sugiere explorar distintos métodos de optimización en el tiempo de envío.

Además, es recomendable optimizar el funcionamiento del servidor puente, con el objetivo de reducir el uso de recursos del sistema. Esto podría lograrse explorando alternativas de almacenamiento más eficientes o empleando métodos de comunicación directa, especialmente en entornos como Firebase.

5.3. Trabajo a futuro

- Se recomienda desarrollar e implementar protocolos de seguridad robustos para garantizar la privacidad y protección de los datos recopilados. Esto permitirá trabajar con confianza en proyectos de mejora, asegurando que la información sea manejada de manera segura y cumpliendo con estándares de privacidad.
- Se podría diseñar e integrar un sistema de almacenamiento en la nube como respaldo para prevenir pérdidas de información en caso de fallas o variaciones físicas en el servidor local. Esta medida no solo asegurará la continuidad del monitoreo, sino que también permitirá un acceso más ágil y confiable a los datos desde cualquier ubicación.
- Se propone ampliar la red de monitoreo mediante la instalación de nuevos Gateways en diferentes localidades. Esto permitirá expandir el área de cobertura, aumentando la capacidad para implementar sensores adicionales que recopilen datos de manera más amplia y detallada, fortaleciendo el sistema global de monitoreo.

Bibliografía

- [1] L. S. Basset, “Proceso patológico de la estructura: lesiones, síntomas y causas,” 2021.
- [2] RAE, “Diccionario de la lengua española — edición del tricentenario — rae - asale.” <https://dle.rae.es/>, 2023. Accessed: May 03, 2024.
- [3] M. A. B. Prado, “Estudio mediante simulación numérica de oscilaciones mecánicas en presencia de fricción,” 2013.
- [4] Aayala, “El puente de la av. hernan gonzales de saa es una realidad.” <https://www.ibarra.gob.ec/site/2023/08/el-puente-de-la-av-hernan-gonzales-de-saa-es-una-realidad/>, Aug. 2023. Accessed: May 03, 2024.
- [5] C. R. M. Guzmán and J. S. M. Noboa, “Estudio de las causas del colapso de puentes en ecuador (2000-2022),” *MQRInvestigar*, vol. 6, pp. 368–395, Oct. 2022.
- [6] D. S. P. Gaibor, J. F. M. Jiménez, and J. L. P. Vélez, “Análisis de la vulnerabilidad de infraestructuras críticas como represas, puentes y carreteras ante eventos asociados al fenómeno de: El niño – oscilación sur en la costa ecuatoriana,” *AlfaPublicaciones*, vol. 6, pp. 45–61, Mar. 2024.
- [7] A. C. L. Carvajalino and P. M. L. Palomino, “Simulación de la respuesta dinámica y análisis de patologías de un grupo de puentes peatonales construidos en estructura metálica, usados para ingreso y salida de estaciones de transmilenio en bogotá d.c..” <http://hdl.handle.net/11349/31179>, Sept. 2022. Accessed: May 06, 2024.

- [8] C. A. C. Méndez, G. M. Castellón, Y. S. C. Pérez, E. L. C. Méndez, A. S. M. Rodríguez, and G. G. del Pino, “Diseño de amortiguador de masa sintonizado para puente,” *Centro Azúcar*, vol. 50, no. 4, 2023.
- [9] S. A. D. L. C. Vega and J. R. P. Adanaque, “Análisis y diseño de puentes en concreto postensado con sistemas de aislamiento y disipador sísmico,” 2022.
- [10] I. E. K. Mekki, A. Kessar, and R. Mouaz, “Design of a printed circuit board for real-time monitoring and control of pipeline’s cathodic protection system via iot and a cloud platform,” *International Journal of Engineering, Transactions A: Basics*, vol. 36, no. 10, pp. 1667–1676, 2023.
- [11] A. A. R. Fúnez, V. A. M. Reyes, and R. C. Castro, “Diseño de sistema electrónico para monitoreo de vibraciones estructurales,” 2020.
- [12] C. P. Zavala, R. S. H. Varela, A. E. G. Avelar, M. A. M. Martínez, N. S. Robles, and G. T. Tinoco, “Monitoreo inteligente de invernadero a escala basado en el internet de las cosas (iot).” www.jvenesenciencia.ugto.mx, Sept. 2023. Accessed: May 06, 2024.
- [13] G. P. Acharya, L. Poluboyina, J. Veeramoorthi, and C. Joydeb, “An efficient and low cost realization of lora based real-time forest protection system,” *Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science*, vol. 34, no. 3, pp. 1452–1462, 2024.
- [14] W. A. Jabbar *et al.*, “Development of lorawan-based iot system for water quality monitoring in rural areas,” *Expert Systems with Applications*, vol. 242, 2024.
- [15] M. Piechowiak, P. Zwierzykowski, and B. Musznicki, “Lorawan metering infrastructure planning in smart cities,” *Applied Sciences (Switzerland)*, vol. 13, no. 14, 2023.

- [16] I. O. Monfort, “Estudio de la arquitectura y el nivel de desarrollo de la red lorawan y de los dispositivos lora.” <http://hdl.handle.net/10609/64365>, June 2017. Accessed: May 05, 2024.
- [17] B. B. Gupta and M. Quamara, “An overview of internet of things (iot): Architectural aspects, challenges, and protocols,” *Concurrency and Computation: Practice and Experience*, vol. 32, Nov. 2020.
- [18] U. Kumar, P. Verma, and S. Q. Abbas, “Bringing edge computing into iot architecture to improve iot network performance,” in *2021 International Conference on Computer Communication and Informatics (ICCCI)*, pp. 1–5, 2021.
- [19] G.-M. Sung, L.-F. Tung, C.-J. Huang, and C.-P. Yu, “Front-end gateway system with serial communication protocol conversion and edge computing platforms,” *IEEE Access*, vol. 11, pp. 93193–93203, 2023.
- [20] C. F. González, C. F. González, and D. Álvarez Sánchez, “Sistema de control y navegación del robot para corredores de atletismo: Robogait,” 2023.
- [21] Z. Kavaliauskas, I. Šajev, G. Blažiūnas, G. Gecevičius, V. Čapas, and D. Adomaitis, “Electronic system for the remote monitoring of solar power plant parameters and environmental conditions,” *Electronics (Switzerland)*, vol. 11, no. 9, 2022.
- [22] P. A. S. Miguel, *Electrónica*. Ecoe Ediciones, 2024.
- [23] E. J. Ortega, E. G. Vílchez, and F. V. Labrador, “Diseño e implementación de una plataforma de aprendizaje de la placa plc-arduino para estudiantes de ingeniería,” 2022.

- [24] mcielectronics, “Señales tx y rx - mci educación.” <https://cursos.mcielectronics.cl/2019/06/18/senales-tx-y-rx/>, Oct. 2024. Accessed: Oct. 05, 2024.
- [25] DRAGINO, “Rs485-bl – waterproof rs485 to lorawan converter - dragino.” <https://wiki.dragino.com/xwiki/bin/view/Main/User%20Manual%20for%20LoRaWAN%20End%20Nodes/test/>, Oct. 2024. Accessed: Oct. 05, 2024.
- [26] R. Peñaló, I. Santana, E. Ysabel, and C. Díaz, “Análisis comparativo de tecnologías de acceso lora y wifi en agricultura de precisión aplicado en invernadero,” *Para pedidos y canjes*, p. 140, 2023.
- [27] D. Pérez and R. Risc, “Implementación de lora y lorawan como escenario futuro de la industrias 4.0 en el sector agroindustrial peruano,” *Revista Campus*, vol. 25, 2020.
- [28] M. A. M. Almuhaya, W. A. Jabbar, N. Sulaiman, and S. Abdulmalek, “A survey on lorawan technology: Recent trends, opportunities, simulation tools and future directions,” *Electronics (Basel)*, vol. 11, no. 1, p. 164, 2022.
- [29] I. Ordóñez Monfort, “Estudio de la arquitectura y el nivel de desarrollo de la red lorawan y de los dispositivos lora,” 2017.
- [30] J. P. M. Álvarez, V. I. R. Abdalá, F. M. R. M. Barboza, and F. R. C. Soria, “Estudio descriptivo de lorawan y aplicaciones específicas,” *Difusión científica, ingeniería y tecnologías*, vol. 15, no. 1, pp. 8–17, 2021.
- [31] E. A. B. Cadena, “Análisis de comunicaciones punto a punto con simulaciones open-source de lora,” *Revista de Investigación en Tecnologías de la Información: RITI*, vol. 10, no. 21, pp. 14–23, 2022.

- [32] S. Hernández Caballero, “Estudio en detalle de lorawan. comparación con otras tecnologías lpwan considerando diferentes patrones de tráfico,” 2020.
- [33] M. A. Moya Quimbita, “Evaluación de pasarela lora/lorawan en entornos urbanos,” 2018.
- [34] T. T. Network, “The things network.” <https://www.thethingsnetwork.org/>, Oct. 2024. Accessed: Oct. 05, 2024.
- [35] K. A. Babativa Santos, “Pruebas de seguridad aplicadas a infraestructura iot,” 2023.
- [36] G. A. Xander, M. E. Sosa, J. A. Olsson, *et al.*, “Uso de enlaces lora en topologías extraurbanas de misiones,” *JIDeTEV*, no. 8, 2018.
- [37] ferrovial, “Oscilaciones y ondas: qué son, relación entre ambas, tipos e importancia.” <https://www.ferrovial.com/es/stem/oscilaciones-y-ondas/>, July 2024. Accessed: Jul. 06, 2024.
- [38] C. Roldán, H. Colorado, and J. Vélez, “Fricción interna y comportamiento anelástico en sólidos,” *Dyna (Medellín)*, vol. 73, Jan. 2006.
- [39] A. S. Azhar, S. A. Kudus, A. Jamadin, N. K. Mustaffa, and K. Sugiura, “Recent vibration-based structural health monitoring on steel bridges: Systematic literature review,” *Ain Shams Engineering Journal*, vol. 15, no. 3, p. 102501, 2024.
- [40] P. Lu, Y. Zhou, Q. Lu, J. Wang, Q. Shi, and D. Li, “Conceptual design of the pedestrian bridge,” *Structural Engineering International*, vol. 32, pp. 470–483, Oct. 2022.
- [41] R. Barker and J. Puckett, *Design of Highway Bridges*. Wiley, 4th ed., 2021.
- [42] E. S. Manrique, “Guía para el diseño de puentes con vigas y losas,” 2004.

- [43] M. G. Camín, “Explotación de un sensor imu para la monitorización del movimiento en tiempo real.” <https://hdl.handle.net/10651/74047>, July 2024. Accessed: Sep. 24, 2024.
- [44] R. H. Sampieri, C. F. Collado, and P. B. Lucio, *Metodología de la investigación*, vol. 4. McGraw Hill, 2006.
- [45] C. C. M. E and M. I. León, “Generalidades sobre metodología de la investigación,” *Campeche*, 2004.
- [46] S. Chasipanta, D. Jazmin, O. Vergara, and M. Stayner, “Métodos y técnicas de investigación,” 2017.
- [47] I. A. L. Reinoso, “Red iot comunitaria con tecnología lora para cultivos urbanos inteligentes: Aplicación.” <https://repositorio.utn.edu.ec/handle/123456789/16243>, 2024. Accessed: Oct. 07, 2024.
- [48] wit motion, “Wt901c 9-axis digital inclinometer accelerometer.” <https://www.wit-motion.com/proztsz/43.html>, Sept. 2024. Accessed: Sep. 30, 2024.
- [49] H. J. Gómez Cubides, S. D. Herrera Moreno, *et al.*, “Sistema de control y gestión utilizando la tecnología gsm basado en comandos at,” 2019.
- [50] MikroTik, “Mikrotik routers and wireless - products: wap lr9 kit.” https://mikrotik.com/product/wap_lr9_kit#fndtn-specifications, Oct. 2024. Accessed: Oct. 05, 2024.
- [51] MikroTik, *wAP LR9 kit*, 2024. Available at: <https://help.mikrotik.com/docs/spaces/UM/pages/14222486/wAP+LR9+kit>.

Anexos

Anexo A. Implementación del Gateway y antena de 5 dBi

En este anexo se presenta la ubicación e instalación del Gateway con su respectiva antena, generando un punto de fácil acceso para la comunicación con los nodos.



Fig. A.1. Gateway instalado en el mástil de la cruz Roja Ecuatoriana de Imbabura.



Fig. A.2. Cubierta protectora del Gateway.



Fig. A.3. Antena implementada en el mástil.



Fig. A.4. Zona de vista para la recepción desde los nodos.

Anexo B. Gráficas recolectadas de la estructura.

En este anexo se presenta los resultados obtenidos directamente desde la estructura, mismos que ya están caracterizados y almacenados, también la ubicación del sensor desde en la estructura.



Fig. B.1. Implementación del sensor en la estructura.

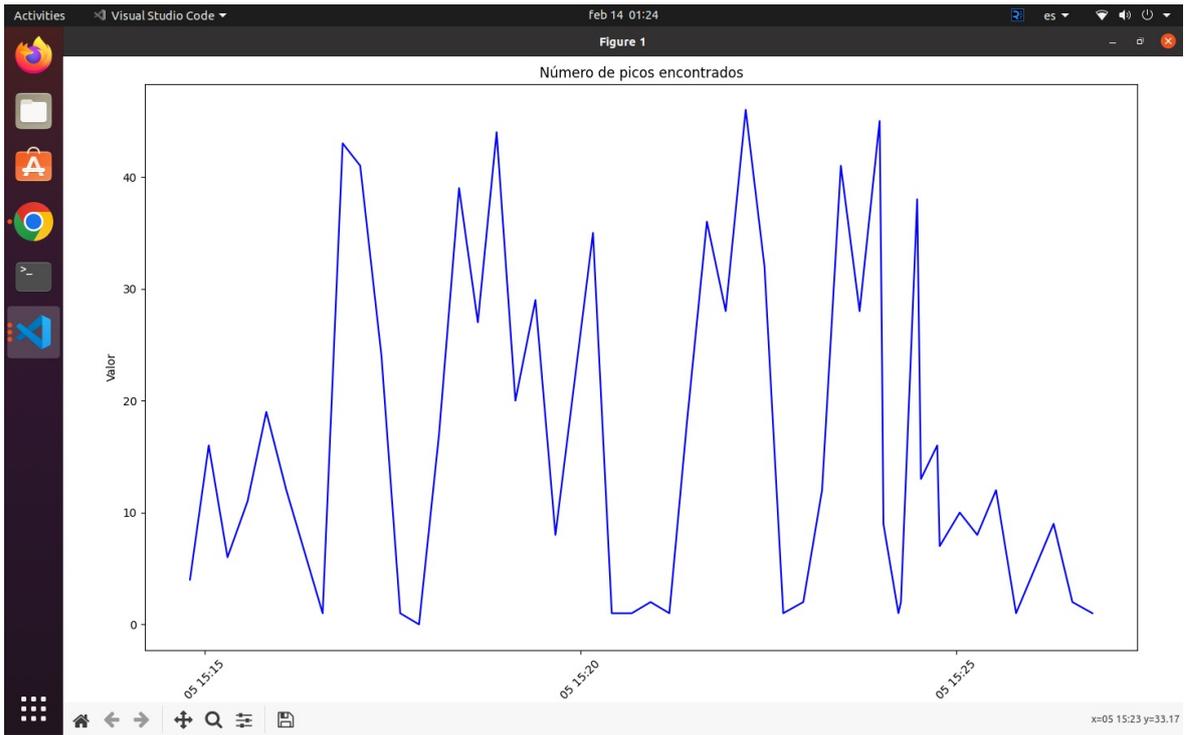


Fig. B.2. Gráfica de número de picos encontrados.

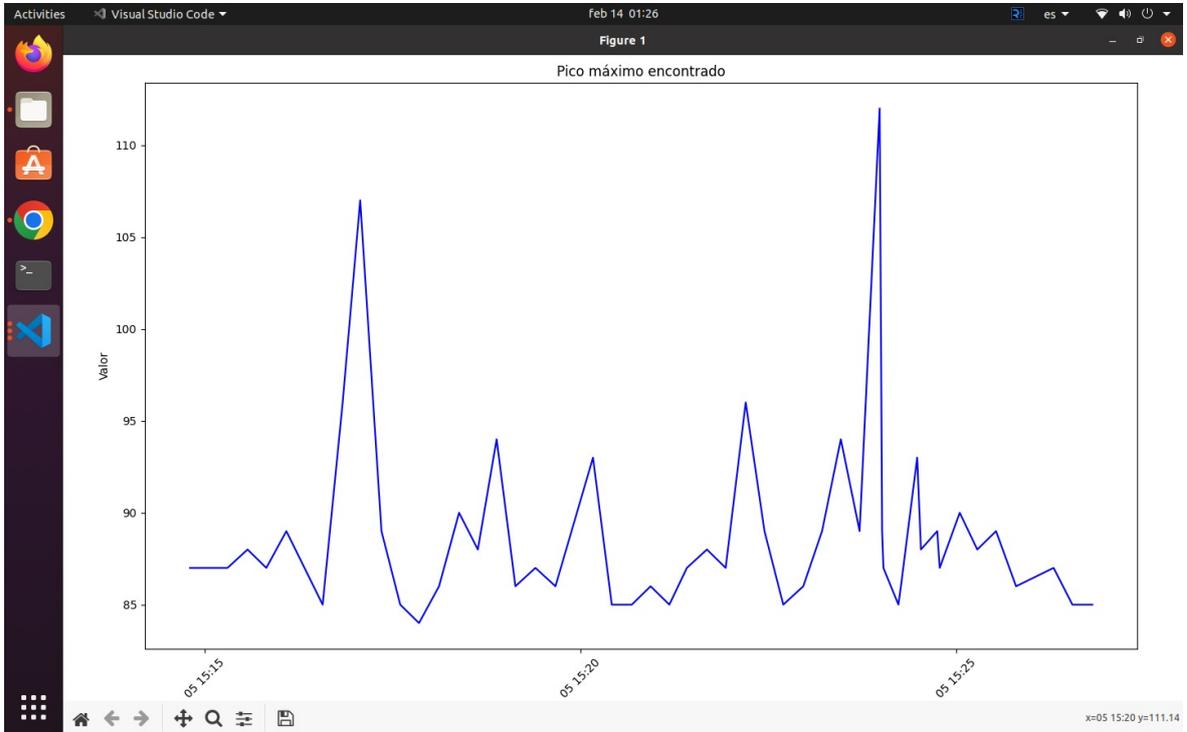


Fig. B.3. Gráfica de picos máximos encontrados.

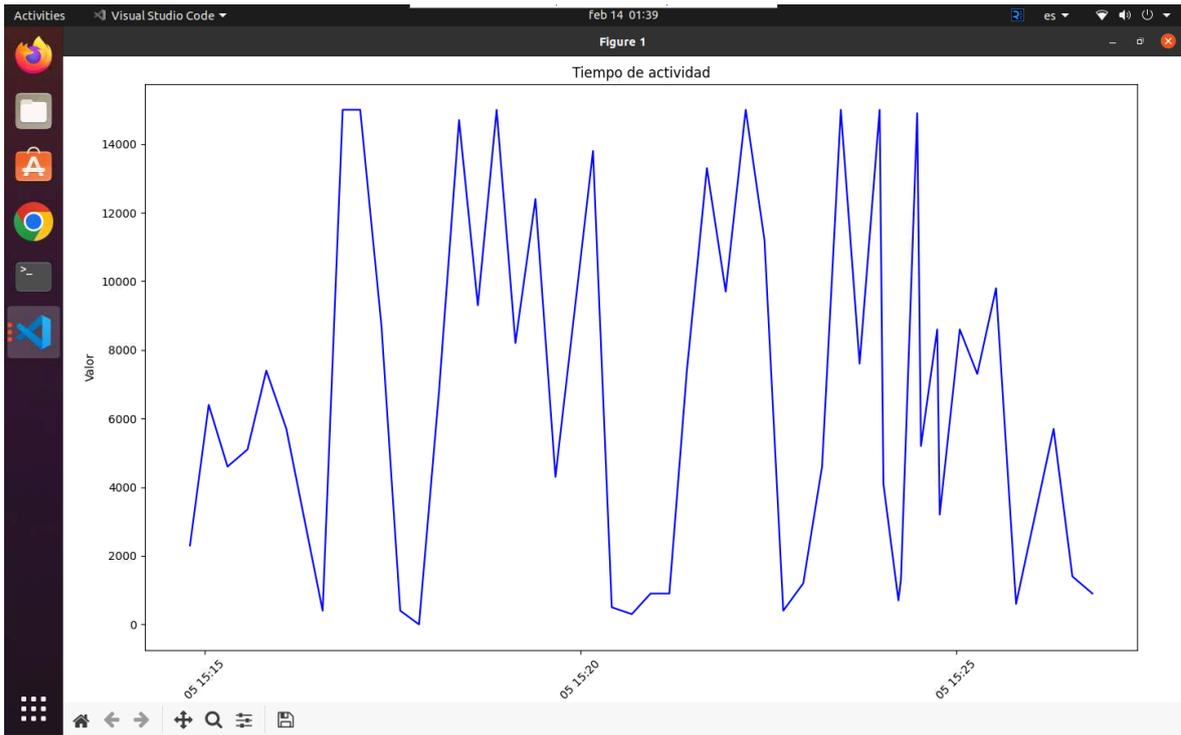


Fig. B.4. Gráfica de Tiempo de actividad.

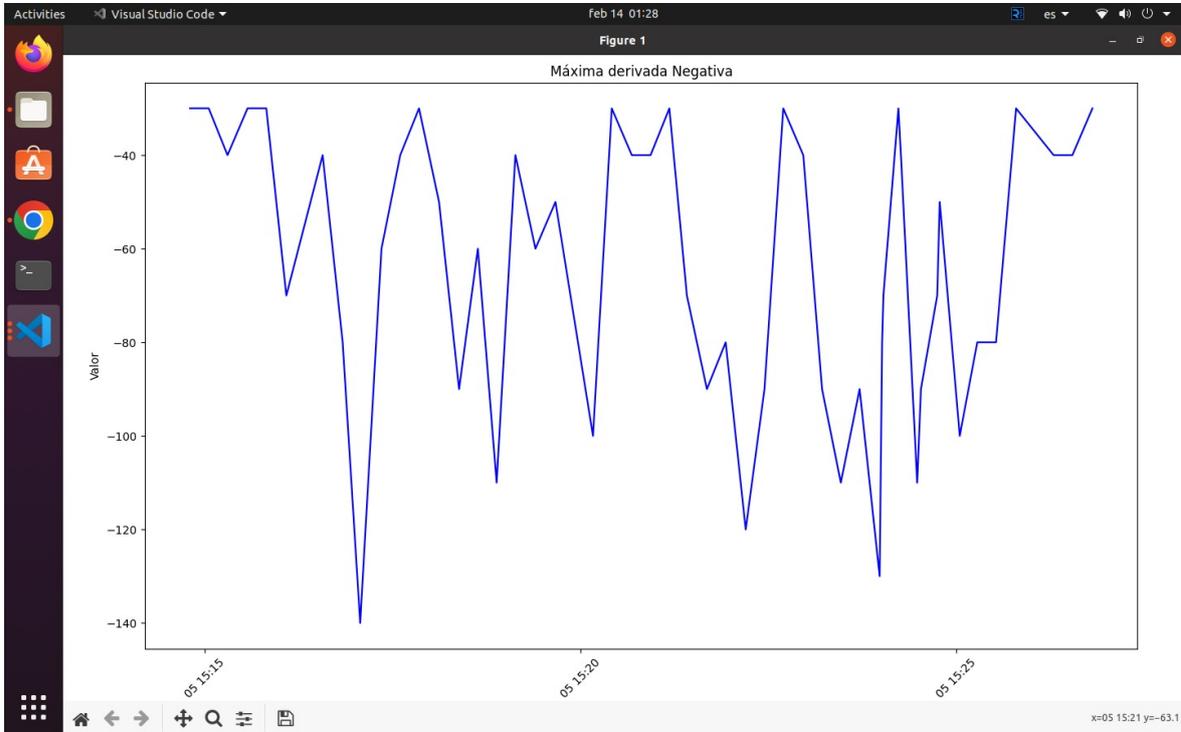


Fig. B.5. Gráfica de Máxima Derivada Negativa.

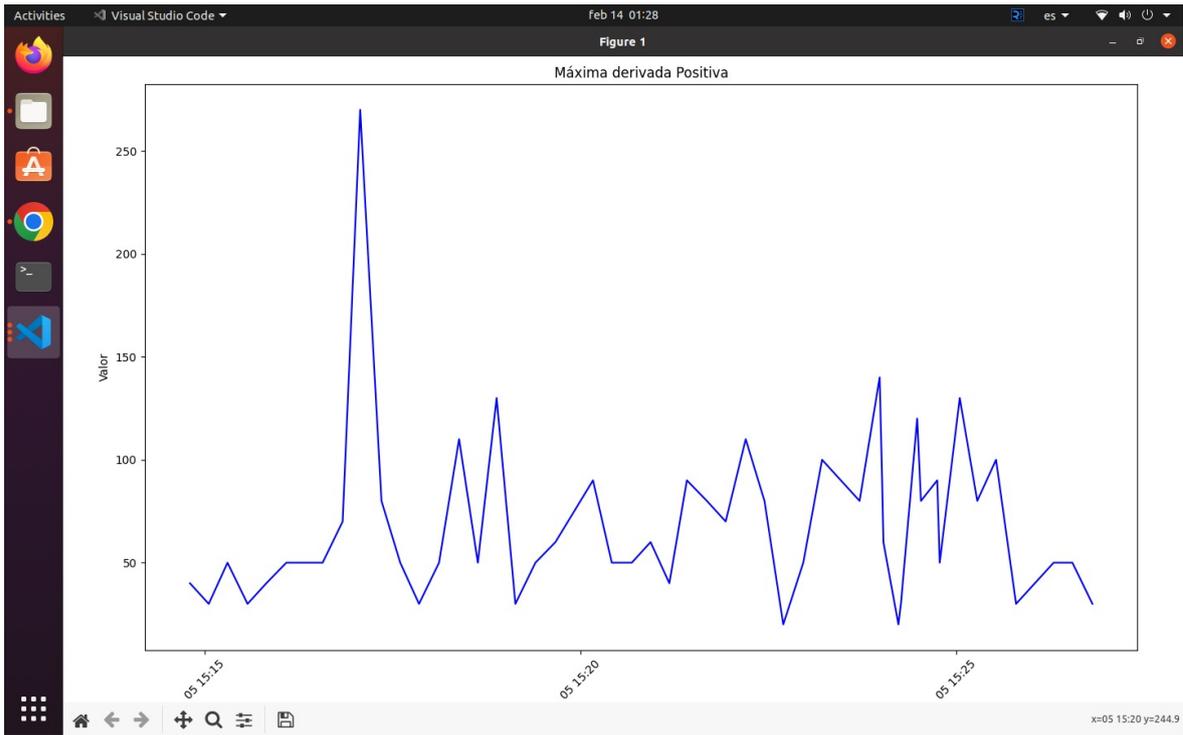


Fig. B.6. Gráfica de Máxima Derivada Positiva.

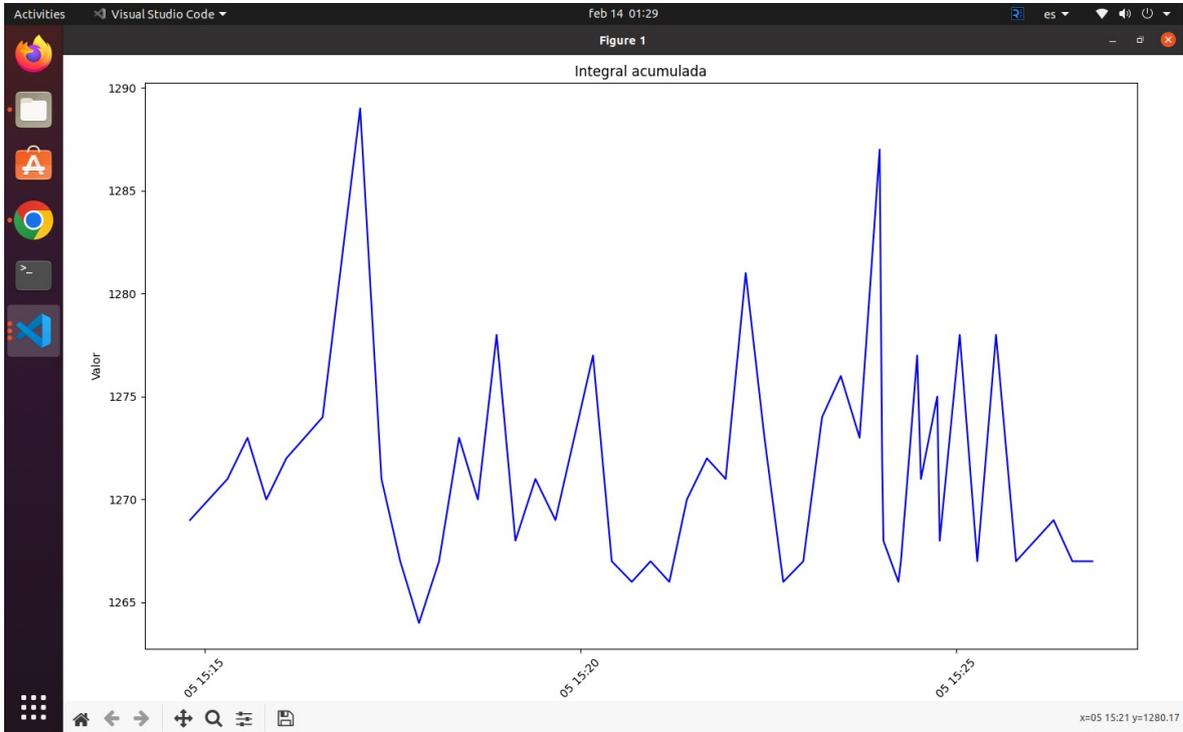


Fig. B.7. Gráfica de Integral Acumulada.

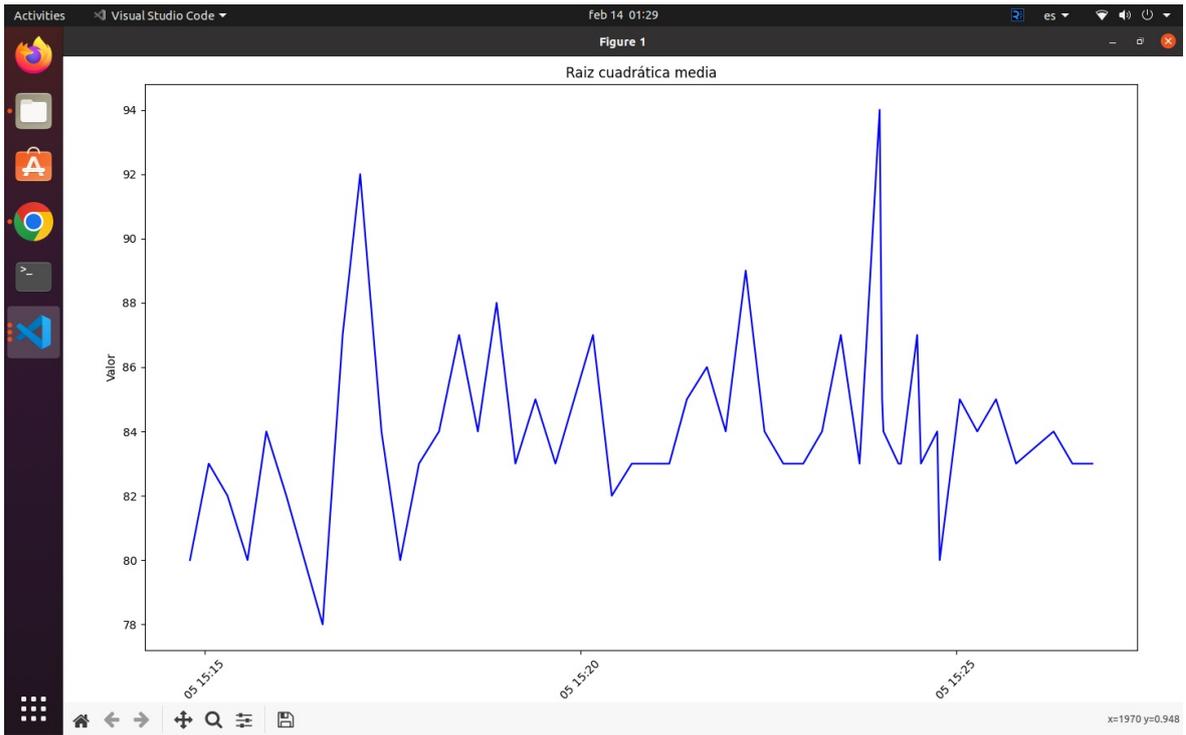


Fig. B.8. Gráfica de Raíz Cuadrática Media.

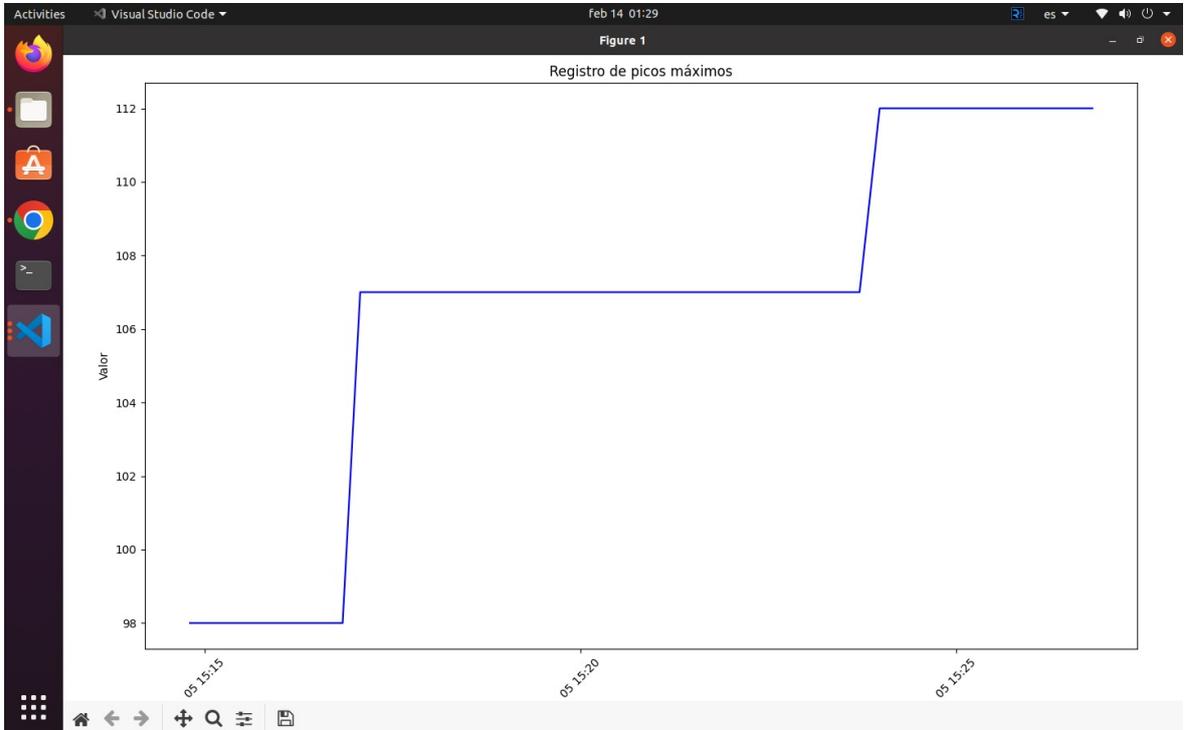


Fig. B.9. Gráfica de Registro de Picos Máximos.

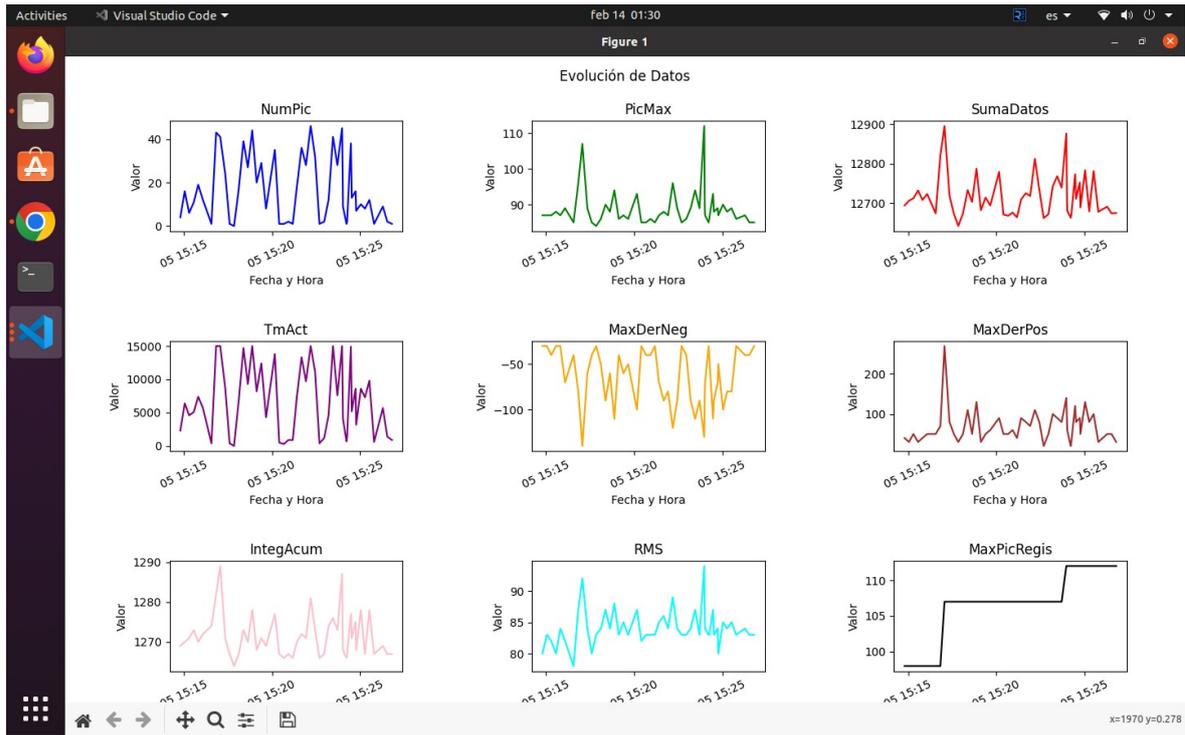


Fig. B.10. Gráfica Conjunta.