



Estación meteorológica IoT basada en TTGO T-Beam y comunicación LoRa

Victor Hernandez-Rodriguez, David Kairuz-Cabrera, Alain Martinez-Laguardia, Pedro Merino-Laso, Olivier Schalm

RESUMEN / ABSTRACT

La variabilidad climática ha aumentado la necesidad de sistemas de monitoreo atmosférico a nivel local. Los datos meteorológicos son útiles para predicción climática, agricultura y manejo de cultivos, gestión de recursos hídricos y estimación de calidad del aire. Las soluciones actuales para obtener datos meteorológicos son típicamente regionales, costosas y dependen de proveedores de telecomunicaciones, limitando el valor de la información y su accesibilidad en áreas rurales o lugares puntuales. En correspondencia al desarrollo de sistemas más asequibles, el siguiente artículo presenta una solución de monitoreo para variables meteorológicas basada en la placa de desarrollo TTGO T-Beam y la estación meteorológica Bresser 5 en 1, utilizando comunicación LoRa. El diseño de hardware propuesto incluye la estación Bresser 5 en 1, dos módulos de desarrollo T-Beam y una computadora personal. La arquitectura de software hace uso de los módulos TTGO T-Beam para transmitir y almacenar las mediciones de la estación meteorológica, la plataforma de IoT "Node-RED" se utiliza para la adquisición de datos, mientras que la plataforma "Grafana" se utiliza para la visualización. Las pruebas de enlace con tecnología LoRa (868MHz), demostraron capacidad para operar a distancias superiores a un kilómetro. Los resultados de la investigación confirmaron la posibilidad y confiabilidad de integrar de forma remota las mediciones de la estación meteorológica Bresser 5 en 1 a una plataforma de IoT de código abierto. Este uso de soluciones de software y hardware abierto permite su generalización por parte de otros investigadores.

Palabras claves: T-Beam, LoRa, IoT, Node-RED, Grafana, estación meteorológica.

Climate variability has increased the need for atmospheric monitoring systems at the local level. Meteorological data are useful for climate prediction, agriculture and crop management, water resources management, and air quality estimation. Current solutions to obtain meteorological data are typically regional, expensive, and depend on telecommunications providers, limiting the value of the information and its accessibility in rural areas or specific places. Corresponding to the development of more affordable systems, the following article presents a monitoring solution for meteorological variables based on the TTGO T-Beam development board and the Bresser 5-in-1 weather station, using LoRa communication. The proposed hardware design includes the Bresser 5-in-1 station, two T-Beam development modules, and a personal computer. The software architecture uses the TTGO T-Beam modules to transmit and store the weather station measurements, the IoT platform "Node-RED" is used for data acquisition, while the "Grafana" platform is used for the visualization. Link tests with LoRa technology (868MHz) demonstrated the ability to operate at distances greater than one kilometer. The research results confirmed the possibility and reliability of remotely integrating measurements from the Bresser 5-in-1 weather station to an open-source IoT platform. This use of open software and hardware solutions allows their generalization by other researchers.

Keywords: T-Beam, LoRa, IoT, Node-RED, Grafana, weather station.

Title: IoT weather station based on TTGO T-Beam and LoRa communication

1.- INTRODUCCIÓN

Los patrones climáticos están experimentando cambios notables, con un incremento en los niveles del mar y una mayor ocurrencia de eventos climáticos extremos [1]. La acción climática se ha convertido en uno de los Objetivos de Desarrollo Sostenible establecidos por las Naciones Unidas en su informe de 2020, debido a la creciente preocupación por los efectos del cambio climático [2]. A nivel mundial se sienten los impactos del cambio climático a través de variaciones en los patrones de lluvia, clima impredecible, temperaturas en aumento y eventos climáticos cada vez más severos [3].

Recibido: 09/2023 Aceptado: 11/2023

La diversidad en las condiciones climáticas ha generado una necesidad de sistemas para monitorear parámetros atmosféricos. En este contexto, el desarrollo de estaciones meteorológicas inteligentes ha ganado popularidad debido a su capacidad para recopilar y transmitir datos en tiempo real [4]. La información obtenida puede tener aplicaciones en diversas áreas, como la predicción de eventos climáticos, la generación de energía, los edificios inteligentes, la agricultura de precisión y la medición de la calidad del aire [5].

Las estaciones meteorológicas inteligentes son dispositivos que utilizan varios sensores para medir parámetros atmosféricos sin la necesidad de intervención humana [6]. A nivel global, hay múltiples fabricantes que ofrecen estos productos, capaces de medir variables como temperatura, humedad relativa, velocidad y dirección del viento, precipitaciones, presión atmosférica y radiación solar [7].

Los sistemas de monitoreo meteorológico generalmente están compuestos por varios sensores que envían sus datos a una unidad de microcontrolador. Esta unidad almacena y procesa los valores obtenidos, y luego los envía para ser visualizados, permitiendo observar tendencias o picos en las variables. Las estaciones meteorológicas inteligentes utilizan plataformas como Arduino [5,6,8], Raspberry Pi [9,10] o ESP32 [11–13] como unidad de microcontrolador. En esta investigación, se seleccionó la estación meteorológica inalámbrica Bresser 5 en 1, modelo 7002510 [14], como sensor, debido a su simplicidad y a que diferentes investigadores la han utilizado con éxito en diversas aplicaciones [15,16].

Entre los métodos de comunicación utilizados en estas estaciones se encuentran Wifi [6] o GPRS [13]. Sin embargo, ambos métodos requieren cobertura de telecomunicaciones, lo que puede dificultar su despliegue en áreas rurales o lugares aislados. En contraste, el protocolo de comunicación LoRa permite establecer enlaces de comunicaciones propietarios a largas distancias. Esta tecnología se ha orientado al desarrollo de aplicaciones de Internet de las Cosas (IoT), logrando enlaces de varios kilómetros entre dispositivos con un consumo energético mínimo [17].

Para complementar estos componentes de hardware sensorial, de cómputo y de comunicaciones, es esencial contar con un software adecuado. Este software debe permitir la interconexión de varios elementos que utilizan diferentes protocolos de comunicación para crear una aplicación funcional y escalable. El uso de APIs (Interfaz de Programación de Aplicaciones) permite ocultar las complejidades técnicas de nivel inferior y dejar a los desarrolladores centrados en la funcionalidad deseada, en lugar de enzarzarse en detalles de implementación complicados. Entre los softwares que aprovechan esta ventaja se destaca la plataforma de IoT “Node-RED” [18,19]. Esta herramienta actúa como un motor de reglas para procesar y dirigir datos, y proporciona bloques sencillos para realizar acciones y una interfaz gráfica para conectar flujos de datos.

En conjunto con Node-RED se pueden utilizar diferentes softwares para la visualización, como Grafana, Kibana, Metabase o Node-RED Dashboard. Sin embargo, Kibana y Metabase se encuentran limitados en cuanto al procesamiento y análisis de los datos en comparación con el resto. Por otro lado, aunque ambas combinaciones tienen sus ventajas, se considera que Grafana es más adecuada que Node-RED Dashboard, ya que ofrece una mayor flexibilidad, capacidad de manejo de datos y opciones de personalización, lo que la convierte en una opción superior si se desea la escalabilidad del proyecto. En la presente aplicación se seleccionó “Node-RED” para la adquisición de las mediciones y la plataforma “Grafana” para su visualización. Ambos entornos son ampliamente utilizados por la comunidad científica [20–23].

En la Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas (UCLV), el Grupo de Automatización, Robótica y Percepción (GARP) y la Facultad de Química-Farmacología, en colaboración con la Academia Marítima de Amberes (AMA), han estado trabajando en el desarrollo de varios sistemas para la medición de variables relacionadas con la calidad del aire [24–26]. Estos sistemas se basan en tecnologías abiertas y sensores de bajo costo calibrados, diseñados para proporcionar información valiosa para la toma de decisiones. Como complemento a estas variables atmosféricas de calidad del aire, se utilizan las variables meteorológicas. Su combinación permite modelar procesos ambientales y realizar predicciones [27,28]. De manera similar, la Escuela Nacional Superior Marítima (École Nationale Supérieure Maritime, ENSM) en Francia ha trabajado en la caracterización de la calidad de los datos generados por sensores utilizados en diferentes contextos profesionales [29].

En el contexto de esta investigación, un nuevo proyecto de cooperación entre el GARP, ENSM y la AMA ha permitido el diseño de una sencilla estación meteorológica con capacidad IoT. El objetivo principal es desarrollar una solución de monitoreo de variables meteorológicas basada en la placa de desarrollo TTGO T-Beam y la estación meteorológica Bresser 5 en 1, utilizando la comunicación LoRa. Este objetivo se basa en la experiencia adquirida con el uso de la placa de desarrollo TTGO T-Beam [25] y la comunicación LoRa integrada en la misma. El sistema desarrollado recopila, transmite (mediante el protocolo LoRa) y visualiza series temporales de cada variable medida. El uso de este hardware permitirá, en un futuro cercano, alcanzar un sistema integrado de calidad del aire y variables meteorológicas que aproveche la experiencia alcanzada en desarrollos previos.

2.- MATERIALES Y MÉTODOS

2.1.- ARQUITECTURA DE HARDWARE

En la Fig. 1 se muestra la estructura de hardware sugerida para el sistema. Esta incluye la estación meteorológica Bresser 5 en 1, dos módulos de desarrollo IoT inalámbrico TTGO T-Beam y una computadora personal. La información recopilada por la estación meteorológica se envía (a través de radiofrecuencia) al primer módulo de desarrollo IoT, conocido como "T-Beam Sender", que luego transmite los datos (utilizando el protocolo LoRa) al segundo módulo de desarrollo IoT, llamado "T-Beam Receiver", estableciendo un enlace a larga distancia. Finalmente, los datos se almacenan en una computadora con acceso a una red local y están disponibles para su monitoreo remoto utilizando un navegador web.

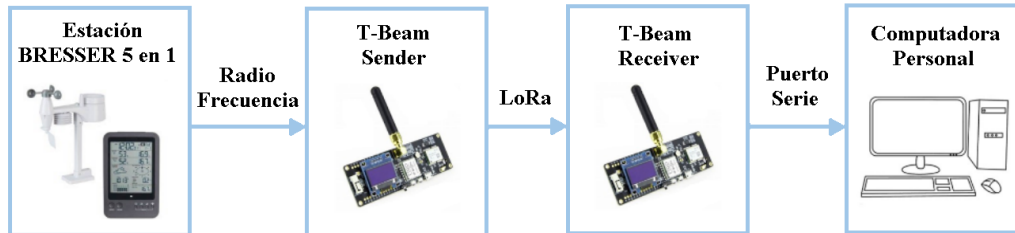


Figura 1

Diagrama general de Hardware.

El dispositivo Bresser 5 en 1, modelo 7002510, es una opción asequible (alrededor de 70 euros) para el seguimiento de variables meteorológicas. En su configuración inicial, Fig. 2A, se compone de una estación base y un sensor externo que puede medir 5 variables meteorológicas: temperatura exterior (-40 °C a 80 °C), humedad relativa (0 a 100 %), dirección (0 a 360°) y velocidad del viento (0 a 180 km/h) y monto pluviométrico (0 a 9999 mm). Ambos sistemas utilizan 3 baterías AA como fuente de energía, debido a su bajo consumo. El sensor externo realiza mediciones cada 45 segundos, que se transmiten por radiofrecuencia (868 MHz) a la estación base. La estación base actualiza y muestra la información recopilada en una pantalla LCD de 14.1 cm. El fabricante sugiere que la estación base y el sensor externo no estén separados por más de 150 metros, ya que podrían surgir problemas de comunicación que requerirían el reinicio de ambos dispositivos. Este rango de comunicación se considera una limitación seria para muchas aplicaciones, aunque es adecuado para un sistema diseñado para satisfacer entornos locales [14]. Sin embargo, mediante el empleo de la comunicación LoRa es posible dar solución a esta limitante.

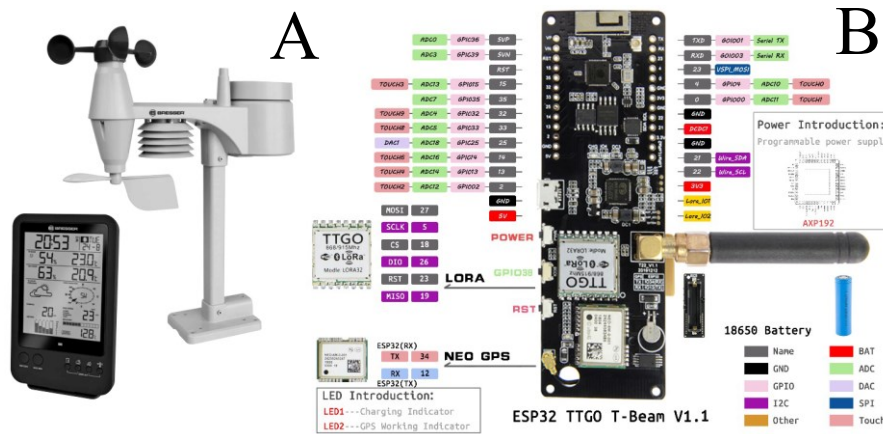


Figura 2

(A) "Bresser 5 en 1" estación base y sensor exterior [14] (B) Placa de desarrollo TTGO T-Beam [30].

El módulo de desarrollo IoT inalámbrico LilyGo TTGO T-Beam T22_V1.1 es un sistema embebido ampliamente utilizado en proyectos de IoT debido a sus características. Como se muestra en la Fig. 2B, esta placa tiene un microcontrolador ESP32, proporciona conectividad Wi-Fi y Bluetooth, integra elementos como el GPS NEO-M8N, almacenamiento en memoria Flash SPI de 4 MB y comunicación LoRa; así como un controlador para batería de celda de litio en formato 18650.

Para asegurar un suministro de energía adecuado, la placa incluye un chip AXP192 de gestión de energía, que regula las tensiones para cada componente y supervisa los ciclos de carga y descarga de la batería de manera eficiente [31,32].

2.2.- ARQUITECTURA DE SOFTWARE

El sistema de monitoreo comienza con la medición y adquisición de datos por parte del sensor exterior de la estación Bresser 5 en 1. La estación exterior transmite los datos a la estación base, esta trama es recibida por el módulo SX1276 en el T-Beam Sender. Este transceptor integrado en la placa de desarrollo TTGO T-Beam soporta los protocolos LoRa, modulación por desplazamiento de frecuencia (FSK por sus siglas en inglés), modulación por encendido y apagado (OOK por sus siglas en inglés) y modulación por desplazamiento mínimo gaussiano (GMSK por sus siglas en inglés).

El TTGO T-Beam puede comunicarse en una de 2 frecuencias: 868 MHz, y 915 MHz. Una vez habilitado por programación mediante la librería “RadioLib.h”, disponible en GitHub, su función se centra en recibir mediante FSK y reenviar empleando LoRa, usando para ambos procedimientos la banda de 868 MHz y una antena de 2 dBi. El módulo T-Beam Receiver que actúa como puente en el trascurso de la trama, recibe estos datos usando el mismo módulo SX1276 y a través de una conexión física, le hace llegar por puerto serial la información a una computadora personal en la cual se está ejecutando Node-RED. En la Fig. 3 se muestra el flujo de programación que presentan los módulos T-Beam Sender y T-Beam Receiver.

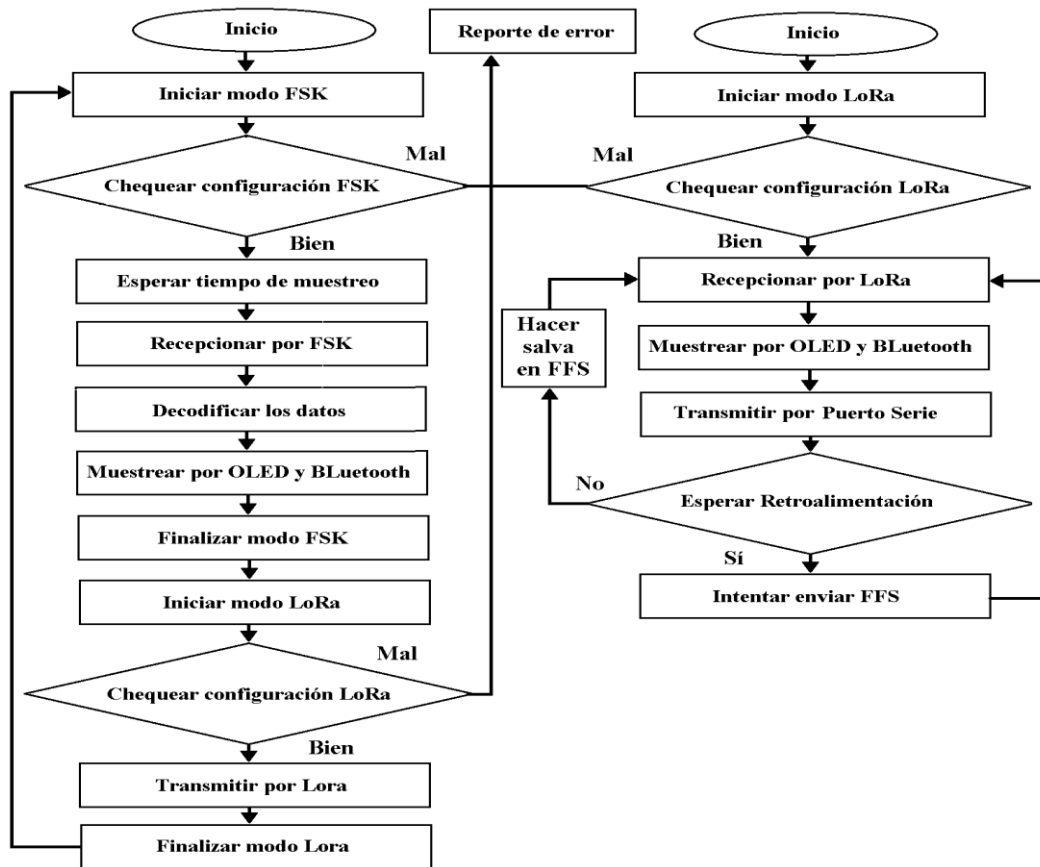


Figura 3

Flujos del T-Beam Sender (izquierda) y T-Beam Receiver(derecha).

La plataforma de IoT Node-RED permite procesar la información adquirida por el sensor exterior. Esta herramienta visual basada en flujos presenta facilidades para la conexión entre dispositivos de hardware, APIs y servicios en línea [18,19]. Es aquí donde se separan cada una de las variables de la trama y se registran de forma ordenada en el sistema de base de datos asociado: InfluxDB. Esta es una de las bases de datos para series temporales optimizada y enfocada al almacenamiento y recuperación de datos de sensores IoT en tiempo real [33].

El elemento de presentación elegido, Grafana, es una plataforma de visualización de datos diseñada para servir como una herramienta de interfaz de usuario. Su enfoque principal se centra en la obtención de datos a través de consultas, lo que

mejora de manera significativa la experiencia de supervisión y seguimiento de la información. Grafana se implementa mediante la creación de paneles interactivos, conocidos como "dashboards", que incluyen diversos tipos de gráficos y widgets. Estos paneles facilitan la supervisión, análisis y representación visual de indicadores y métricas clave. Además, Grafana permite configurar alertas, lo que posibilita el seguimiento en tiempo real del estado de cualquier proceso.

La plataforma "Grafana" permite conectar con diversas fuentes de datos, como Graphite, Prometheus, InfluxDB, Elasticsearch, MySQL y PostgreSQL. Ofrece una amplia gama de opciones de visualización, entre las que se destacan: mapas geográficos y de calor, histogramas y otras ventanas con comportamiento visual que faciliten el estudio de datos. La plataforma permite rastrear el comportamiento de usuarios y puede ser implementada localmente, para no comprometer, por razones de seguridad u otras, la información con proveedores de nube [34]. El uso de Grafana simplifica la necesidad de experiencia del usuario final.

La combinación de estos tres elementos de software permite procesar, almacenar y visualizar, mediante gráficos, la información obtenida de forma remota por el sensor exterior de la estación meteorológica. La arquitectura de software del sistema utiliza un enfoque IoT de código abierto compuesto por un Backend (Node-RED e InfluxDB) y un Frontend (Grafana) lo que provee una baja complejidad y una alta personalización tanto para programadores como usuarios.

2.2.- SISTEMA DE COMUNICACIONES

La comunicación LoRa, utilizada entre el módulo T-Beam Sender y el T-Beam Receiver, se destaca por su elevado alcance, que puede superar varios kilómetros. Sin embargo, su efectividad puede verse influenciada por las condiciones ambientales y la potencia de transmisión de 100 mW del microcontrolador. En una evaluación realizada cerca de Santa Clara, se configuró el sistema con un Spreading Factor de 7 y una frecuencia de 868 MHz. El Spreading Factor, que determina cuántas veces la señal se extiende en el tiempo, se seleccionó cuidadosamente para equilibrar la eficiencia de la comunicación y la distancia de transmisión, lo que lo hace adecuado para aplicaciones que requieren de medio a largo alcance y una velocidad de transmisión moderada.

Durante el experimento, se llevaron a cabo 23 pruebas en la zona, variando la distancia entre los módulos T-Beam Sender y T-Beam Receiver en cada una de ellas. Las pruebas se llevaron a cabo en una zona abierta y despejada, ubicada en las afueras de la ciudad de Santa Clara. Esta ubicación fue seleccionada específicamente con el objetivo de minimizar cualquier interferencia potencial de edificios y tráfico vehicular para evaluar la comunicación LoRa en condiciones de propagación ideales.

3.- RESULTADOS

Con el objetivo de validar la arquitectura IoT implementada, se establecieron dos campañas de medición de varios días, una en un punto céntrico de la ciudad de Santa Clara y la otra en la Facultad de Ingeniería Eléctrica de la UCLV. Para la primera se instaló la estación meteorológica Bresser 5 en 1 en el punto más alto de un edificio de dos plantas a una altura aproximada de 13 metros, como se muestra en la Fig. 4A. Para mejorar la protección y portabilidad de las placas de desarrollo TTGO T-Beam, se fabricaron encapsulados utilizando una impresora 3D Vertex modelo K8403. Los diseños se obtuvieron de Internet y la impresión se realizó en la UCLV, Fig. 4B.

Del 24 al 30 de septiembre se llevó a cabo la campaña de mediciones, con frecuencia de muestreo 2 minutos. Durante este período, se experimentaron tardes de descargas eléctricas que provocaron múltiples cortes eléctricos y lluvia constante. Estas circunstancias permitieron comprobar la efectividad de la salva de respaldo en los elementos TTGO T-Beam (energizados con baterías) y hacer uso del pluviómetro integrado en el dispositivo. Los resultados indican que los módulos son capaces de almacenar con una frecuencia de muestreo de 2 minutos durante 40 días aproximadamente, escribiendo a una tasa promedio de 45 bytes por iteración.

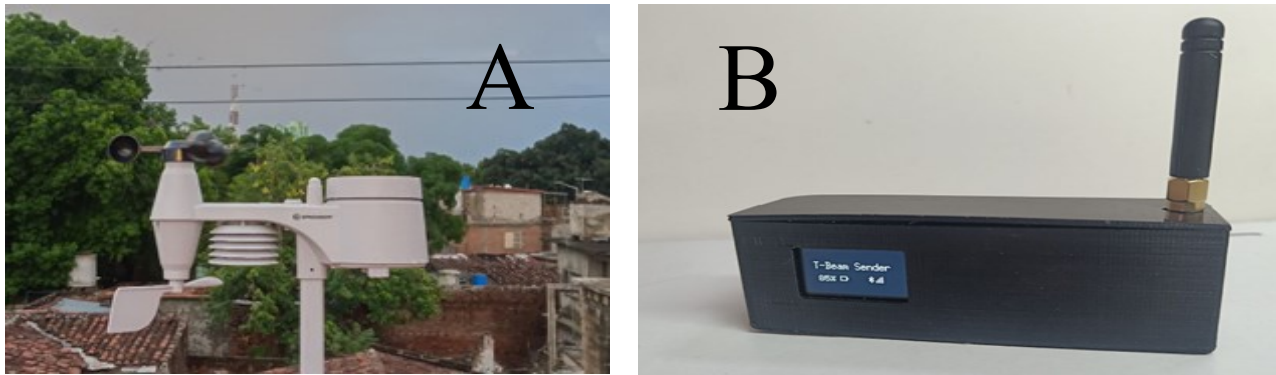


Figura 4

(A) Bresser 5 en 1 instalada. (B) T-Beam en su encapsulado.

En la Fig. 5 se muestra un fragmento del panel de Grafana creado, donde se visualizan las variables medidas durante un periodo de tres días (del 25 a las 00:00 al 28 a las 00:00 de septiembre) de los seis en los que tuvo lugar la campaña. Durante la medición, se registraron valores de humedad superiores al 90% por periodos de tiempo considerables, con una media de 86.9% durante los días analizados, propio del clima tropical de Cuba. Además, se registró un acumulado de 23.2 mm de lluvia durante esos tres días, con cambios visibles durante la tarde del día 25 y lluvias débiles pero sostenidas durante la noche del día 26 y la madrugada del día 27, cuando se registraron 23.5°C, los valores de temperatura más bajos de la gráfica.

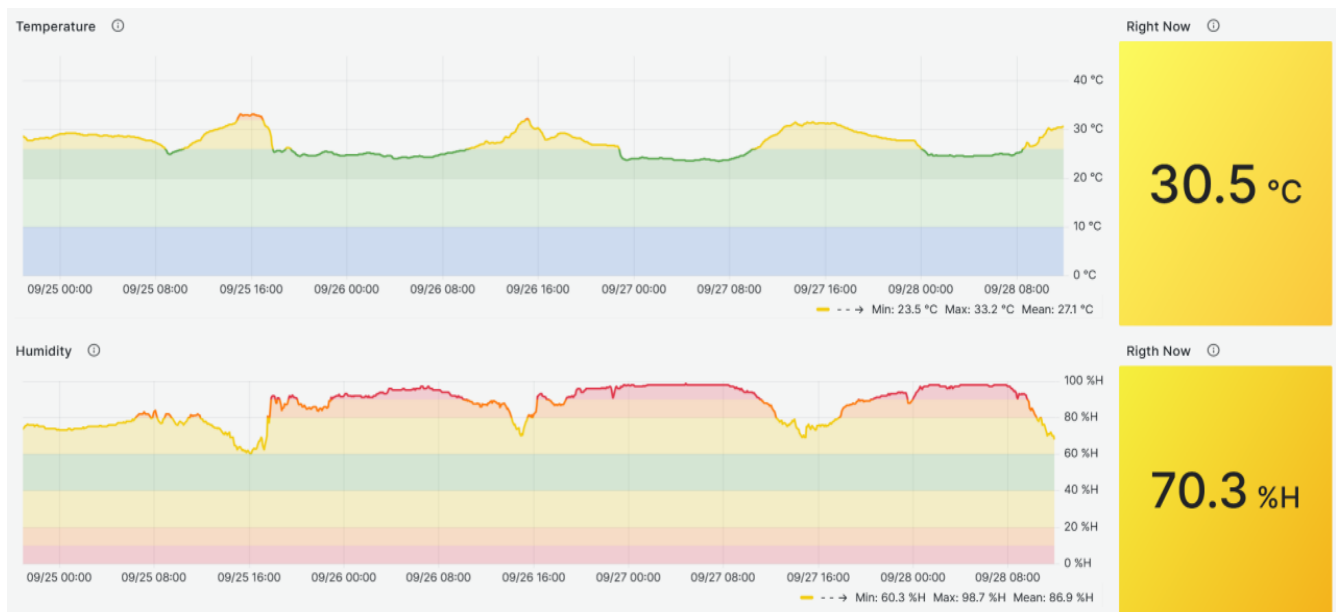


Figura 5

Fragmento de un dashboard creado en Grafana.

3.1.- OTRAS EVALUACIONES Y ANÁLISIS ECONÓMICO

Determinar la distancia adecuada entre los elementos transmisor (T-Beam Sender) y receptor (T-Beam Receiver) se considera de gran importancia para el desarrollo de aplicaciones. Para esto se realizaron un grupo de pruebas progresivas empleando la antena que proporciona el fabricante del microcontrolador hasta alcanzar una distancia de 1.5 km sin pérdida de paquetes. El error de frecuencia en Hz, SNR (Relación señal-ruido por sus siglas en inglés) en dB y RSSI (Indicador de intensidad de la señal recibida por sus siglas en inglés) en dBm en estas pruebas muestran patrones correlativos con la distancia en metros como se muestra en la figura 6.

Los resultados demostraron que incluso distancias 10 veces mayores (1.5 km) de las sugeridas por el fabricante pueden ser alcanzadas de manera confiable bajo condiciones similares a las de esta prueba. El error de frecuencia tiende a aumentar, lo cual es consistente con las características de la tecnología LoRa. El SNR disminuye desde +9.5 hasta -9.5 dB a medida que aumenta la distancia. Los valores positivos indican señales más fuertes que el ruido y valores negativos señales más débiles. El RSSI muestra un comportamiento similar con la distancia a medida que se aleja del emisor. Estos resultados sugieren que la comunicación LoRa se ve afectada por factores como la distancia, la interferencia de señal y la degradación de la señal. Sin embargo, de manera general se observa que el protocolo LoRa con la placa TTGO T-beam logra alcanzar las distancias estimadas de uso para la aplicación.

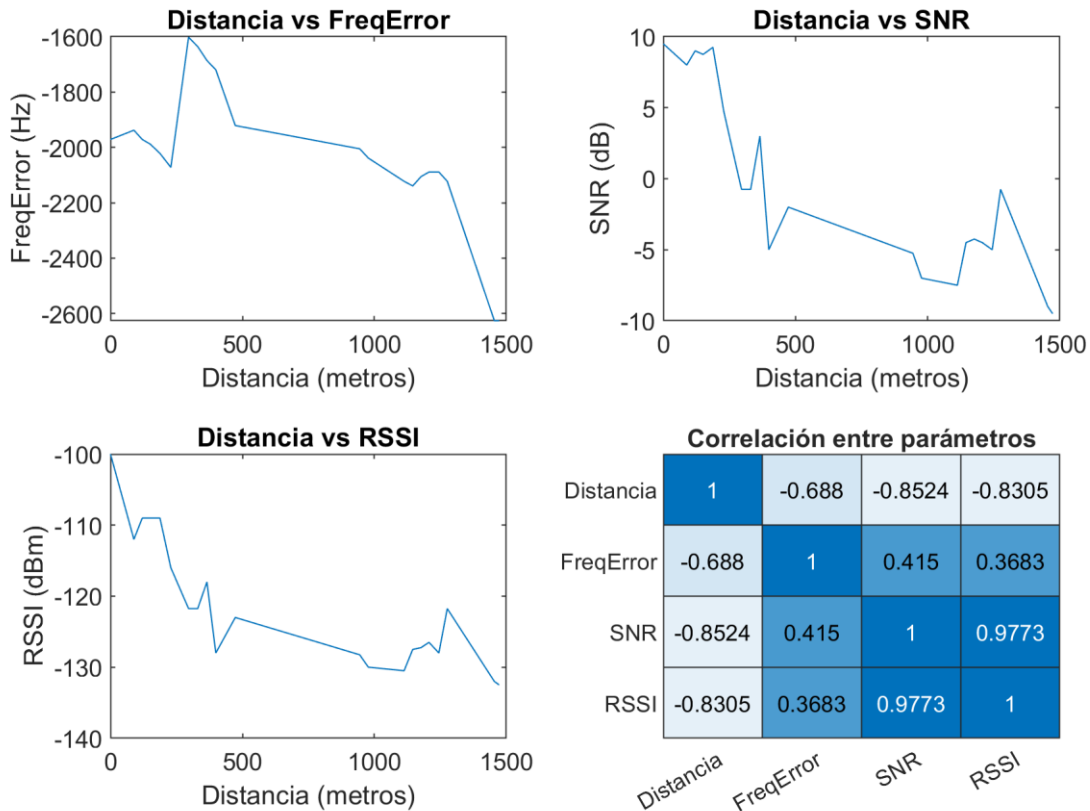


Figura 6

Resultado de las pruebas de distancia.

Los componentes empleados para la implementación de la estación meteorológica IoT presentada ascienden a 154 EUR, desglosados en: placas de desarrollo TTGO T-Beam (39 EUR x 2), estación Bresser 5 in 1 (70 EUR) y encapsulados para los TTGO T-Beam (6 EUR). Otros productos en el mercado con prestaciones similares como la estación Ambient Weather WS-2902C [35] se pueden adquirir a partir de los 175 EUR o la Davis Vantage Pro2 [36] cuyo precio comienza en los 900 EUR. Por lo que este valor total demuestra un sistema viable para múltiples aplicaciones que requieran de forma local información meteorológica. La relación coste-eficiencia destaca la accesibilidad y asequibilidad de la tecnología empleada en contraste con alternativas existentes en el mercado, lo que potencialmente favorece la adopción y el despliegue más amplio de soluciones basadas en esta plataforma. Los gastos de generalización del sistema estarían asociados a la importación de productos, pero se considera que nunca excederían el 10 % del total del valor por unidad.

4.- CONCLUSIONES

El sistema desarrollado satisface las necesidades para las que fue creado al proporcionar de forma remota información sobre las variables medidas. El uso de soluciones de software y hardware de código abierto permite su generalización por parte de otros investigadores, sin la necesidad de pagar cuotas de licencia ni cuotas anuales asociadas a su funcionamiento. La utilización de Node-RED facilita la escalabilidad del sistema para la incorporación de otros protocolos de entrada, como TCP o MQTT, y otros nodos de salida, como el panel de control de Node-RED. La plataforma de visualización Grafana se

considera adecuada para las funcionalidades integradas en la versión actual del sistema. En conjunto, Node-RED y Grafana deberían permitir mejoras e incremento de prestaciones a corto plazo.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al VLIR-UOS por el apoyo financiero brindado mediante el proyecto Global Minds “A low-cost measuring device to directly monitor exhaust gases generated by fuel engines: Design, development, validation”. De igual forma agradecen al proyecto “Low-cost sensor system to improve decision support to evaluate the impact of the air quality” financiado por la embajada de Francia en Cuba a través de Acuerdo Hubert Curien titulado Carlos J. Finlay.

REFERENCIAS

1. Panja A, Garai S, Zade SS, Sahani S. Climate Data Extraction for Social Science Research: A Step by Step Process. En: *Social Science Dimensions of Climate Resilient Agriculture*. 2023. Disponible en: <https://www.researchgate.net/publication/372951383>
2. Arora NK, Mishra I. United Nations Sustainable Development Goals 2030 and environmental sustainability: race against time. *Environ Sustain*. 2019;2(4):339-42. Disponible en: <https://doi.org/10.1007/s42398-019-00092-y>
3. Ebi KL, Vanos J, Baldwin JW, Bell JE, Hondula DM, Errett NA, et al. Extreme Weather and Climate Change: Population Health and Health System Implications. *Annu Rev Public Health*. 1 de abril de 2021 [citado 13 de diciembre de 2023];42:293-315. Disponible en: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/33406378/>
4. Singh DK, Sobti R. Development of Wi-Fi-Based Weather Station WSN-Node for Precision Irrigation in Agriculture 4.0. *Lect Notes Electr Eng*. 2022;841:39-49.
5. Leelavinodhan PB, Vecchio M, Antonelli F, Maestrini A, Brunelli D. Design and Implementation of an Energy-Efficient Weather Station for Wind Data Collection. *Sensors* 2021, Vol 21, Page 3831. 1 de junio de 2021 [citado 14 de agosto de 2023];21(11):3831. Disponible en: <https://www.mdpi.com/1424-8220/21/11/3831/htm>
6. Radhi AA, Al-Naima FMM. Design of a Prototype Local Smart Weather Station Based on Wi-Fi. *2022 Int Conf Innov Intell Informatics, Comput Technol 3ICT 2022*. 2022;559-65.
7. Ioannou K, Karampatzakis D, Amanatidis P, Aggelopoulos V, Karmiris I. Low-Cost Automatic Weather Stations in the Internet of Things. *Information*. 29 de marzo de 2021;12(4):146.
8. Kusriyanto M, Putra AA. Weather Station Design Using IoT Platform Based On Arduino Mega. *ISESD 2018 - Int Symp Electron Smart Devices Smart Devices Big Data Anal Mach Learn*. 7 de enero de 2019;
9. Herdianzenda L, Siswanto D, Istiadi Istiadi. Design of Portable Automatic Weather Station Based on Raspberry Pi. *J Sci Appl Eng*. 2021;4(1):33-43.
10. Mathur V, Saini Y, Giri V, Choudhary V, Bharadwaj U, Kumar V. Weather Station Using Raspberry Pi. En: *2021 Sixth International Conference on Image Information Processing (ICIIP)*. IEEE; 2021. p. 279-83.
11. Mamat NH, Shazali HA, Othman WZ. Development of a Weather Station with Water Level and Waterflow Detection using Arduino. *J Phys Conf Ser*. 2022;2319(1).
12. Megantoro P, Aldhama SA, Prihandana GS, Vigneshwaran P. IoT-based weather station with air quality measurement using ESP32 for environmental aerial condition study. *Telkommika (Telecommunication Comput Electron Control*. 2021;19(4):1316-25.
13. Priambodo AS, Nugroho AP. Design & Implementation of Solar Powered Automatic Weather Station based on ESP32 and GPRS Module. *J Phys Conf Ser*. 28 de enero de 2021;1737(1).
14. Bresser station data sheet [Internet]. [citado 4 de octubre de 2023]. Disponible en: <https://www.bresser.de/out/media/8abd1b94e004efda93d2a43597f96e43.pdf>
15. De Luca J, Zaffaroni-Caorsi V, Bosch J, Llusia D, Beltrán JF, Márquez R. Effect of natural abiotic soil vibrations, rainfall and wind on anuran calling behavior: a test with captive-bred midwife toads (*Alytes obstetricans*). *J Comp Physiol A*. 12 de enero de 2023;209(1):105-13.
16. Kreyer M, Behringer V, Deimel C, Fruth B. Neopterin Levels in Bonobos Vary Seasonally and Reflect Symptomatic Respiratory Infections. *Ecohealth*. 15 de marzo de 2023;20(1):93-104.
17. Zourmand A, Kun Hing AL, Wai Hung C, AbdulRehman M. Internet of Things (IoT) using LoRa technology. En: *2019 IEEE International Conference on Automatic Control and Intelligent Systems (I2CACIS)*. IEEE; 2019. p. 324-30.

18. Chen D, Chen J, Tong Y, - al, Sasikala G, Poorna Sai Chandra Y, et al. Developing an IoT-Based Digital Climate Station at Dramaga Climate Observational Station. *IOP Conf Ser Earth Environ Sci.* 1 de mayo de 2023 [citado 1 de octubre de 2023];1167(1):012033. Disponible en: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/1167/1/012033>
19. Clerissi D, Leotta M, Reggio G, Ricca F. Towards an approach for developing and testing Node-RED IoT systems. En: *Proceedings of the 1st ACM SIGSOFT International Workshop on Ensemble-Based Software Engineering.* New York, NY, USA: ACM; 2018. p. 1-8.
20. Bahmanyar D, Razmjoooy N, Mirjalili S. Multi-objective scheduling of IoT-enabled smart homes for energy management based on Arithmetic Optimization Algorithm: A Node-RED and NodeMCU module-based technique. *Knowledge-Based Syst.* 8 de julio de 2022;247:108762.
21. Anam K, Rofi DN, Meiyanti R. Monitoring System for Temperature and Humidity Sensors in the Production Room Using Node-Red as the Backend and Grafana as the Frontend. *J Syst Eng Inf Technol.* 17 de septiembre de 2023;2(2):68-76.
22. Baig MJA, Iqbal MT, Jamil M, Khan J. Design and implementation of an open-Source IoT and blockchain-based peer-to-peer energy trading platform using ESP32-S2, Node-Red and, MQTT protocol. *Energy Reports.* noviembre de 2021;7:5733-46.
23. Nițulescu IV, Korodi A. Supervisory Control and Data Acquisition Approach in Node-RED: Application and Discussions. *IoT 2020, Vol 1, Pages 76-91.* 10 de agosto de 2020 [citado 13 de diciembre de 2023];1(1):76-91. Disponible en: <https://www.mdpi.com/2624-831X/1/1/5/htm>
24. González Rivero RA, Schalm O, Alvarez Cruz A, Hernández Rodríguez E, Morales Pérez MC, Alejo Sánchez D, et al. Relevance and Reliability of Outdoor SO2 Monitoring in Low-Income Countries Using Low-Cost Sensors. *Atmosphere (Basel).* 23 de mayo de 2023;14(6):912.
25. Hernandez-Rodriguez E, Kairuz-Cabrera D, Martinez A, González-Rivero RA, Schalm O. Low-Cost Portable System for the Estimation of Air Quality. En: *Studies in Systems, Decision and Control.* Springer Science and Business Media Deutschland GmbH; 2023 [citado 13 de diciembre de 2023]. p. 287-97. Disponible en: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-031-26361-3_25
26. Martinez A, Hernandez-Rodriguez E, Hernandez L, Schalm O, González-Rivero RA, Alejo-Sánchez D. Design of a Low-Cost System for the Measurement of Variables Associated With Air Quality. *IEEE Embed Syst Lett.* junio de 2023;15(2):105-8.
27. Liu Y, Zhou Y, Lu J. Exploring the relationship between air pollution and meteorological conditions in China under environmental governance. *Sci Reports* 2020 101. 3 de septiembre de 2020 [citado 13 de diciembre de 2023];10(1):1-11. Disponible en: <https://www.nature.com/articles/s41598-020-71338-7>
28. Zhang Y, Zhang R, Ma Q, Wang Y, Wang Q, Huang Z, et al. A feature selection and multi-model fusion-based approach of predicting air quality. *ISA Trans.* 1 de mayo de 2020 [citado 13 de diciembre de 2023];100:210-20. Disponible en: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/31812248/>
29. Laso PM, Brosset D, Puentes J. Analysis of quality measurements to categorize anomalies in sensor systems. En: *2017 Computing Conference.* IEEE; 2017. p. 1330-8.
30. LilyGo. No Title [Internet]. [citado 3 de diciembre de 2023]. Disponible en: <https://www.lilygo.cc/>
31. Freire-Sánchez L, Coello-Gavilanes M, Freire-Sánchez L, Coello-Gavilanes M. Monitoreo térmico ambiental inalámbrico en cultivos. *Rev Digit Novasinerugia.* 5 de julio de 2022 [citado 11 de julio de 2023];5(2):76-89. Disponible en: http://scielo.senescyt.gob.ec/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2631-26542022000200076&lng=es&nrm=iso&tlng=es
32. Matilla DM, Murciego AL, Jimenez Bravo DM, Sales Mendes A, Quietinho Leithardt VR. Low cost center pivot irrigation monitoring systems based on IoT and LoRaWAN technologies. *2020 IEEE Int Work Metrol Agric For MetroAgriFor 2020 - Proc.* 4 de noviembre de 2020;262-7.
33. Shah B, Jat PM, Sashidhar K. Performance Study of Time Series Databases. 30 de agosto de 2022;
34. Aggoune A, Benratem Z. ECG Data Visualization: Combining the power of Grafana and InfluxDB. En: *2023 International Conference on Advances in Electronics, Control and Communication Systems (ICAEECS).* IEEE; 2023. p. 1-6.
35. Heng LY, Rana ME, Abdulla R, Tripathy HK. Design and Development Recommendations for a Smart Weather Monitoring System. *ASSIC 2022 - Proc Int Conf Adv Smart, Secur Intell Comput.* 2022;

36. Tenzin S, Siyang S, Pobkrut T, Kerdcharoen T. Low cost weather station for climate-smart agriculture. 2017 9th Int Conf Knowl Smart Technol Crunching Inf Everything, KST 2017. 23 de marzo de 2017;172-7.

CONFLICTO DE INTERESES

Ninguno de los autores manifestó la existencia de posibles conflictos de intereses que debieran ser declarados en relación con este artículo.

CONTRIBUCIONES DE LOS AUTORES

Victor Hernandez-Rodriguez: Curación de datos, análisis formal, investigación, software, validación – verificación, visualización, redacción – borrador original, redacción – revisión y edición.

David Kairuz-Cabrera: Conceptualización, metodología, administración de proyecto, recursos, software, validación – verificación, redacción – borrador original, redacción – revisión y edición.

Alain Martinez-Laguardia: Conceptualización, metodología, administración de proyecto, recursos, supervisión, validación – verificación, redacción – borrador original, redacción – revisión y edición.

Pedro Merino-Laso: Conceptualización, adquisición de fondos, administración de proyecto, metodología, revisión y edición.

Olivier Schalm: Conceptualización, adquisición de fondos, metodología, recursos, revisión y edición.

AUTORES

Victor Manuel Hernández Rodríguez, Ing. en Automática, COSIE Centro, Villa Clara, Cuba, ecna.baggio@gmail.com, ORCID: 0000-0002-5996-8142. Investigador asociado al Grupo de Automatización Robótica y Percepción (GARP) de la Universidad Central Marta Abreu de Las Villas y optante al título académico M. Sc. en Automática en dicha institución.

David Kairuz-Cabrera, Ing. en Automática, Universidad Central Marta Abreu de Las Villas, Villa Clara, Cuba, david.kairuz.cabrera@gmail.com, ORCID: 0000-0002-1313-8135. Optante al título académico M. Sc. en Automática en la Universidad Central Marta Abreu de Las Villas. Miembro del Grupo de Automatización Robótica y Percepción (GARP). Instructor en el Departamento de Control Automático de la Facultad de Ingeniería Eléctrica.

Alain Sebastián Martínez Laguardia, Ing. en Automática (UCLV, 2001), Doctor en Ciencias Técnicas (VUB/UCLV, 2015), Profesor Titular del departamento de Control Automático de la Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas, Villa Clara, Cuba, amguardia@uclv.edu.cu, ORCID: 0000-0002-6873-126X. Investiga en temas relacionados con el diseño de sistemas embebidos y el desarrollo de vehículos autónomos, sus aplicaciones y técnicas de navegación. Actualmente dirige y supervisa el desarrollo de sistemas de medición de calidad del aire, basados en sensores de bajo costo y hardware/software de código abierto.

Pedro Merino, Ing. en Telecomunicaciones (UVA, 2013), Doctor en Informática (IMTA, 2017), Investigador en la Escuela Nacional Superior Marítima (ENSM) y del instituto de investigación de la Escuela Naval (IRENaV), Nantes, Francia, pedro.merino-laso@supmaritime.fr, ORCID: 0000-0002-9297-988X. Investiga en temas relacionados con la calidad de los datos adquiridos por redes de sensores, industria 4.0 y la seguridad de estos sistemas. Actualmente dirige y supervisa diferentes proyectos con temáticas de sensores conectados y ciberseguridad con aplicaciones marítimas.

Olivier Schalm, Se graduó como químico analítico en la Universidad de Amberes en 1994 y obtuvo su doctorado en 2001. Actualmente, es investigador de la Academia Marítima de Amberes, Bélgica, olivier.schalm@hzs.be; ORCID: 0000-0001-8705-7293. Investiga en la utilización de sensores de bajo coste en un contexto marítimo. Su investigación abarca la calidad del aire y el monitoreo del movimiento, la visualización de datos y la traducción de mediciones de contaminantes en evaluaciones de riesgos para la salud humana en un contexto ocupacional y no ocupacional.

