

Monitoreo remoto de variables ambientales a larga distancia con sistemas embebidos Remote monitoring of long-distance environmental variables using embedded

Dennise Bautista-Vivanco ^{a,*}, Luz N. Oliva-Moreno ^{a,*}, Ian Ilizaliturri-Flores ^a

^a Unidad Profesional Interdisciplinaria de Ingeniería Campus Hidalgo, Instituto Politécnico Nacional, 42162, San Agustín Tlaxiaca, Hidalgo, México.

Resumen

Este estudio presenta el desarrollo de un sistema de monitoreo remoto de variables ambientales utilizando un sistema embebido para facilitar la telemetría a larga distancia y en entornos de difícil acceso. El sistema está conformado por un nodo acoplado a un panel solar con baterías recargables para su autonomía y sin conexión a red eléctrica. El nodo se encuentra diseñado para adaptar un conjunto de sensores y de manera predeterminada está equipado con un sensor de temperatura y presión. El sistema se diseñó con el objetivo de tener una eficiencia energética alta y largas distancias de transmisión, utilizando tecnología de comunicación LoRa (Long-Range) y sistemas electrónicos apropiados. En conjunto se desarrolló un dispositivo puerta de enlace (Gateway) LoRa- Ethernet con protocolo MQTT (Message Queuing Telemetry Transport) enlazado al servidor Eclipse Mosquitto para su futuro almacenamiento y procesamiento a la nube de cómputo AWS IoT (Amazon Web Services Internet of Things), mediante un Front y Back-end, sistema que en pruebas alcanzó 300 metros en transmisión aproximadamente.

Palabras Clave: Dispositivo puerta de enlace, LoRa, Nodo, Sistema embebido, Variables ambientales.

Abstract

This study presents the development of a remote monitoring system for environmental variables using an embedded system to facilitate long-distance telemetry and in difficult-to-access environments. The system is made up of a node coupled to a solar panel with rechargeable batteries for its autonomy and without connection to the electrical network. The node is designed to accommodate a set of sensors and by default is equipped with a temperature and pressure sensor. The system was designed with the objective of having high energy efficiency and long transmission distances, using LoRa (Long-Range) communication technology and appropriate electronic systems. Together, a LoRa-Ethernet Gateway was developed with the MQTT (Message Queuing Telemetry Transport) protocol linked to the Eclipse Mosquitto server for future storage and processing in the AWS IoT (Amazon Web Services Internet of Things) computing cloud, through a Front and Back -end, a system that in tests reached approximately 300 meters in transmission.

Keywords: Gateway, LoRa, Node, Embedded system, Environmental variables.

1. Introducción

Actualmente, el monitoreo de variables ambientales es crucial para abordar problemas en la gestión medioambiental, cuestión que a su vez es de gran importancia, pues acorde a (Gunarathne *et al.*, 2021) la gestión medioambiental es esencial para abordar los desafíos ambientales contemporáneos y asegurar la sostenibilidad a largo plazo, por ello al implementar prácticas de gestión ambiental efectivas es posible una mejora significativa en el rendimiento ambiental y de servicios en las ciudades en crecimiento, especialmente en los países en desarrollo.

Además, el monitoreo remoto también representa una oportunidad para innovar en sectores donde se requiera

información, no obstante, no es posible mantener un monitoreo permanente cuando se trata de áreas remotas pues las condiciones físicas y el costo que ello conlleva es un desafío. Dado a lo anteriormente señalado, el monitoreo remoto de variables es una oportunidad de innovación y desarrollo en agricultura inteligente, meteorología-climatología, en la gestión de desastres naturales y de recursos ambientales, de igual manera es una herramienta para impulsar el desarrollo de sistemas sustentables, la implementación de esta actividad en diversos sectores requiere el monitoreo de variables de presión y temperatura, lo cual es argumentado por (Rosen, 2012), Las mediciones de presión y temperatura son fundamentales tanto en ingeniería como para la sostenibilidad de los ecosistemas por varias razones. En ingeniería, estos parámetros son

*Autor para la correspondencia: denisseybv2406@gmail.com

Correo electrónico: denisseybv2406@gmail.com (Denisse Yemirel Bautista-Vivanco), loliva@ipn.mx (Luz Noé Oliva-Moreno), iflores@ipn.mx (Ian Ilizaliturri-Flores).

cruciales para la operación segura y eficiente de diversos sistemas y procesos industriales. Los ejemplos que el autor propone son la gestión de recursos hídricos, la medición precisa de la presión y la temperatura ayuda a optimizar el uso del agua y a garantizar la integridad de las infraestructuras hidráulicas.

De igual manera (Moore *et al.*, 2021) señalan que, desde una perspectiva ecológica, la medición de la temperatura es esencial para estudiar y mitigar los efectos del cambio climático en los ecosistemas. La precisión en estas mediciones permite a los científicos evaluar el impacto de las fluctuaciones de temperatura en la biodiversidad y en los procesos ecológicos clave, contribuyendo así a estrategias de conservación más efectivas, siendo este un argumento que respalda la importancia de la medición de temperatura como variable ambiental.

El impacto que puede tener la implementación de la tecnología LoRa es sumamente prometedor, pues considerando la información previa existen diversos campos que se verían sumamente beneficiados, además de los sectores ya expuestos también se encuentra el industrial, que como mencionan (Singh and Sharma, 2023) la implementación de LoRa en aplicaciones inteligentes ha mostrado ser eficaz para la creación de infraestructuras conectadas de manera ubicua, permitiendo servicios y aplicaciones innovadoras siendo atractivas y beneficiosas tanto para los consumidores como para las industrias, una de ellas donde la tecnología LoRa tiene el potencial ser altamente eficaz la agricultura Inteligente como lo indican (Dinesh et al., 2024), quienes señalan que la tecnología LoRa proporciona una solución de bajo costo y bajo consumo energético para la agricultura inteligente, facilitando la recolección y transmisión de datos críticos mejorando así la toma de decisiones dentro de la gestión agrícola.

De igual manera (Yang, 2020) argumenta que la tecnología LoRa se está integrando cada vez más en los sistemas de agricultura inteligente la tecnología LoRa, lo anterior debido a que es conocida por sus capacidades de comunicación de largo alcance y bajo consumo de energía, lo cual mejora la eficiencia y la fiabilidad de la transmisión de datos en extensos campos agrícolas, siendo este un plus y una ventaja de la implementación de LoRa ante el resto de las industrias y los demás sectores que fueron mencionados inicialmente.

Contemplando las mismas ventajas (Sulaiman *et al.*, 2022) consideran que la tecnología LoRa ha ganado una considerable atención en la industria tecnológica, debido a las ventajas expuestas: su capacidad para proporcionar conectividad de largo alcance con un bajo consumo de energía, lo cual la hace ideal para aplicaciones en el Internet de las Cosas, Área en donde acorde con (Edwin, 2022) la tecnología LoRa es ampliamente adecuada para aplicaciones de IoT debido a su alcance extenso, bajo consumo de energía y capacidad para manejar un gran número de nodos en una red. De igual manera (Ji *et al.*, 2019) resalta que el esquema de monitoreo basado en LoRa en el sector la agricultura con IoT ofrece una solución robusta y eficiente para la supervisión remota de las condiciones físicas, destacando su capacidad para cubrir grandes áreas con una infraestructura de red mínima.

Dado lo anteriormente mencionado, se puede afirmar que la tecnología LoRa es una herramienta que permite la obtención de información de manera constante que facilita la interpretación de grandes volúmenes de datos y la

identificación de patrones y tendencias significativas de forma automatizada y eficiente.

Esta tecnología no solo ha resultado ser innovadora y llamativa en el sector industrial-comercial, sino también en la investigación, según indica (Haxhibeqiri, 2018), quien señala que esto se debe a su capacidad para comunicarse con bajo consumo y baja tasa de datos en grandes áreas.

Por su parte, (Gaitan, 2020) también considera que la tecnología LoRa es innovadora y eficiente para transmitir datos a baja velocidad y bajo consumo en áreas grandes, siendo útil en la detección de incendios forestales en tiempo real, permitiendo una rápida respuesta en zonas no vigiladas, siendo este un claro ejemplo de apoyo en el sector de sostenibilidad por parte de la tecnología LoRa.

La implementación de una comunicación inalámbrica con tecnología LoRa es de mucha utilidad para este tipo de sistemas donde se requiere un bajo consumo energético y largo alcance, pues permite la independencia ante las redes celulares comerciales para el envío de información.

Para tratar la situación anterior se desarrolló el sistema en dos partes, en primera instancia se trabajó con el nodo de transmisión de información como ya se ha descrito, el cual envía inalámbricamente la información a la segunda parte del sistema desarrollada que es el Gateway LoRa-Ethernet que recibe la información y la sube al servidor Eclipse Mosquitto a través de la tarjeta Raspberry Pi. En la siguiente sección, se presenta el diseño conceptual del sistema, el cual detalla la estructura y funcionamiento de ambas partes del sistema.

2. Diseño conceptual del sistema de comunicación a larga distancia

El sistema general de monitoreo remoto consiste en dos subsistemas, uno de ellos tendrá asignada la recolección y transmisión de variables bajo operación remota e independiente a través de un sistema de energía solar fotovoltaica, por otra parte, se encuentra el sistema de recepción de información conformado un Gateway que recibe la información utilizando el protocolo de comunicación LoRa y posteriormente a través de la tarjeta Raspberry pi sube la información a un servidor utilizando comunicación ethernet y MQTT, la estructura del sistema general se puede observar en la Figura 1.



Figura 1: Diagrama a bloques del sistema de monitoreo remoto.

Los elementos fundamentales del subsistema encargado de la recolección y transmisión de datos son los que se muestran en seguida:

1. Nodo de Sensores: Este nodo está equipado con un

sistema embebido con arquitectura adaptable para colocar diferentes sensores, actualmente solo tiene instalado un sensor encargado de medir las variables ambientales de temperatura y presión.

2. Energía fotovoltaica de baja potencia: El nodo funciona de manera autónoma utilizando un panel solar fotovoltaico que suministra energía, asegurando operación continua y sostenible.
3. Módulo de Comunicación LoRa: Los datos recopilados por los sensores se transmiten inalámbricamente a través del módulo Ebyte E220 LoRa, que ofrece un alcance de comunicación extendido y bajo consumo de energía.

En la sección 3 se detallan los elementos mencionados en esta parte.

En cuanto al segundo subsistema encargado de la recepción y manejo de datos, también cuenta con tres elementos diferentes que son el pilar para su funcionamiento.

1. Gateway LoRa-Ethernet Ebyte E90-DTU: Este dispositivo actúa como un puente entre la red de sensores y la red de datos. Recibe la información transmitida por el nodo del subsistema anterior a través de tecnología LoRa y la envía a la Raspberry Pi mediante conexión Ethernet.
2. Raspberry Pi: Esta tarjeta de procesamiento ejecuta un script que toma los datos recibidos y los sube al servidor Eclipse Mosquitto utilizando el protocolo MQTT. La Raspberry Pi también realiza tareas de procesamiento básico, como la conversión de formatos de datos.
3. Servidor Eclipse Mosquitto: Este servidor MQTT gestiona la visualización de datos a los usuarios finales, a través de la publicación de mensajes, facilitando un monitoreo en tiempo real.

3. Diseño del sistema embebido para la recopilación y transmisión de las variables

Se consideraron los siguientes elementos para su incorporación en la placa del sistema embebido que conforma el nodo de transmisión:

- Sensor de temperatura y presión BMP280
- Pantalla de visualización tipo OLED SSD1306
- Módulo de comunicación LoRa E220- 900T22D
- Módulo de comunicación Lora SX1276
- Microcontrolador Rp2040 a través de la tarjeta Raspberry Pi Pico

Las variables de monitoreo son temperatura y presión, pues son aquellas que brinda el sensor seleccionado: BMP280. Cabe

destacar que para la implementación de dicho dispositivo se tuvieron las siguientes consideraciones:

- La medición de presión está vinculada y es directamente dependiente de la medición de temperatura.
- Tiene un error por luminosidad, por ello se debe evitar que la luz incida directamente sobre él.
El protocolo de comunicación empleado es I²C

También se consideró el sensor BME280 para implementación y pruebas futuras, pues trabaja bajo el mismo protocolo de comunicación y de manera complementaria proporciona las mediciones para una variable adicional: humedad.

El funcionamiento del sistema al trabajar con los dispositivos anteriores radica en tomar las mediciones (inicialmente de temperatura y posteriormente de presión) a través del sensor BMP280, visualizar dicha información en la pantalla OLED SSD1306 para verificación de la información durante las pruebas de autonomía del sistema, y posteriormente enviar las mediciones a través del módulo LoRa E220-900T22D. El módulo adicional de tecnología LoRa Sx1276 se encuentra integrado en el sistema embebido con la intención de suplir al módulo principal en caso de alguna situación externa que impida el funcionamiento de dicho módulo.

Derivado del microcontrolador seleccionado, el lenguaje de programación utilizado fue MicroPython para poner en marcha los dispositivos listados anteriormente, bajo los siguientes protocolos de comunicación.

Tabla 1: Protocolos de comunicación empleados con los dispositivos del sistema de transmisión

Dispositivo	Protocolo de comunicación
BMP280	I2C
Oled SSD1306	I2C
LoRa E220-900T22D	UART
Lora SX1276	SPI

El sistema embebido es de una arquitectura de hardware flexible para poder realizar el cambio de sensores o dispositivos sin tener que construir una nueva placa, por ende el diseño de placa de circuito impreso (PCB) integró las conexiones por medio de header's que permiten conectar los dispositivos al microcontrolador sin cableado pero con la facilidad de desmontarse del sistema, bajo el mismo argumento dentro del sistema de transmisión se implementaron elementos adicionales para activar o desactivar de forma manual el sistema en caso de ser requerido entre ellos se encuentran header's para las conexiones de alimentación, entre otros como se puede ver en la Figura 2.

Tras definir los pines del microcontrolador y las conexiones se realizaron algunas pruebas de funcionamiento para verificar tales conexiones, y posteriormente se diseñó la tarjeta de circuito impreso (PCB) para el sistema a través del software Altium como se muestra en la Figura 3.

4. Implementación del subsistema de potencia

Para la autonomía en la parte del nodo, se implementó un sistema de alimentación con energía solar a partir de una celda fotovoltaica de 10 watts a 12 volts, que produce corriente directa, No obstante el resto del sistema embebido opera con 3.3V por lo tanto, se redujo el voltaje de alimentación a esta cantidad incorporando un módulo de tipo Buck LM2596, de conversión DC-DC que ayuda a regular el voltaje de alimentación para que pueda almacenarse en un banco de baterías que alimentan al sistema embebido

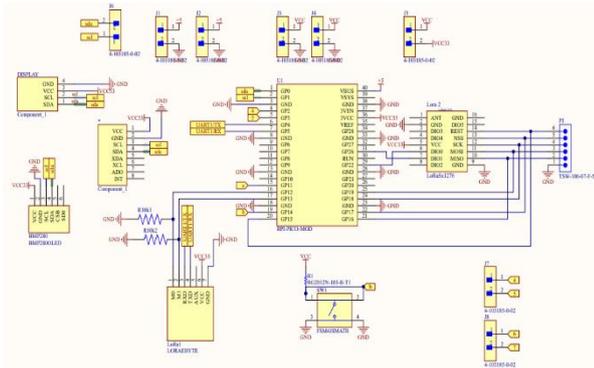


Figura 2: Esquemático del sistema de transmisión.

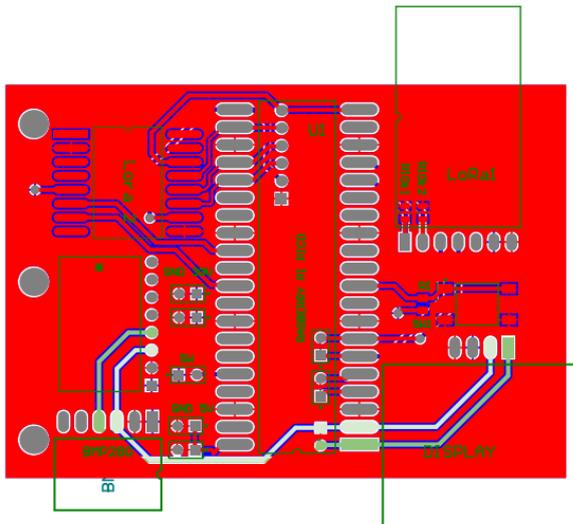


Figura 3: Diseño PCB para el sistema embebido de medición y transmisión.

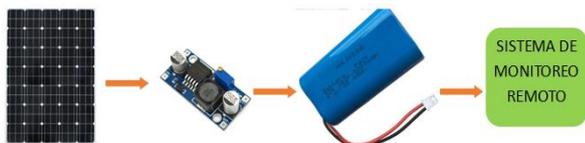


Figura 4: Diagrama de bloques de sistema de alimentación-potencia.

5. Configuración del sistema de recepción de información

El subsistema de recepción se conforma por el Gateway E90-DTU y una Raspberry Pi modelo 3B. En funcionamiento

radica en que el Gateway que también posee tecnología LoRa, recibe la información enviada por el módulo E220-900T22D del nodo transmisor, los cuales acorde a la descripción del fabricante tiene una distancia de cobertura de 10Km, En el caso del Gateway se pretende que se ubique a la interperie para facilitar las condiciones de recibimiento de la señal, no obstante trabaja de la mano con la tarjeta Raspberry Pi para subir la información al servidor Eclipse Mosquitto en un tópico denominado como “prueba/nueva/lor”, sin embargo la tarjeta Raspberry Pi debe estar conectada a red wifi y de igual manera debe estar al alcance del usuario para acceder remotamente a ella o a través de la conexión básica que consiste en completar el sistema con un monitor, mouse y teclado, para lograr lo anterior se implementó el POE (Power Over Ethernet), todas estas etapas a continuación se describen.

5.1 Comunicación E220-900T22D con el Gateway E90-DTU

Si bien se ha mencionado que ambos dispositivos cuentan con tecnología LoRa, no obstante, esto no basta para establecer comunicación entre ellos, sino que se debe llevar a cabo la configuración de canal en ambos dispositivos para que puedan coincidir en la frecuencia de operación para el continente americano que es de 915 MHz, dato que de igual manera brinda el fabricante, y con ello se pueda realizar correctamente el proceso de transmisión-recepción.

5.1.1 Configuración de canal del LoRa Ebyte E220-900T22D

Para configurar el canal del módulo E220-900T22D, se empleó un módulo conversor USB a serial TTL, siguiendo las conexiones que a continuación se muestran, posteriormente se descargó del sitio web de Ebyte el software de configuración correspondiente a este módulo.

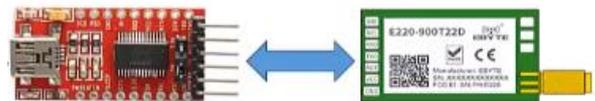


Figura 5: Conexión del módulo E220-900T22D al conversor FT32 para su configuración a través del software Ebyte.

La configuración de canal consistió en abrir el software proporcionado por el fabricante, habiendo conectado a un puerto serial o USB de la computadora el módulo a través del conversor FT32. Una vez que se verificó en el administrador de dispositivos la conexión o puerto COM al que correspondía el dispositivo, se abrió el software y se desplegó la siguiente ventana.

Como se indicó en la Figura 6, en la parte superior se seleccionó el puerto COM al que corresponde el dispositivo y posteriormente se selecciona la opción “open” para poder acceder a los parámetros de configuración que se muestran en la parte inferior, de los cuales el fabricante indica modificar únicamente la parte correspondiente al canal (Channel), en donde se configuró al canal 65, la selección realizada se basó en que la frecuencia en la que trabaja el dispositivo para el continente americano que es de 915MHz corresponde al

número de canal 65. También era posible configurar los parámetros de address y key cuidando que al configurar el Gateway estos parámetros coincidan. En este caso ambos permanecen en 0. Posteriormente se fijaron los parámetros con “set params” y se cerró con “close”, opciones que aparecen en la parte superior.

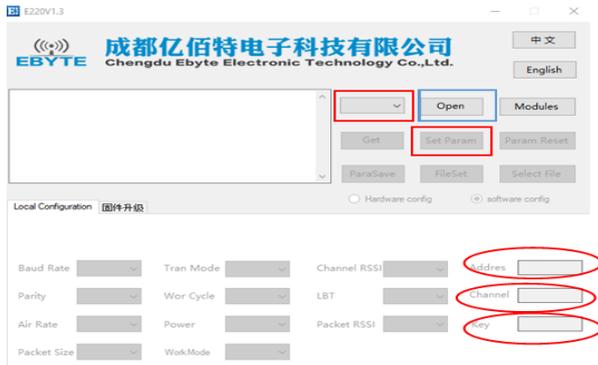


Figura 6: Software de configuración para el módulo ebyte E220-900T22D.

Una vez configurado, el sistema pudo ser implementado como parte del nodo de transmisión de datos al instalarse dentro del sistema embebido desarrollado, en donde a través de código en lenguaje MicroPython se leyeron las variables de temperatura y presión del sensor BMP280 para que posteriormente bajo el protocolo de comunicación UART entre la tarjeta Raspberry Pi Pico y el módulo de comunicación Ebyte E220 se transmitan al subsistema receptor a través de LoRa.

5.1.2 Configuración de Gateway E90 DTU

Para realizar esta configuración, de igual manera se trabajó con el software que proporcionó el fabricante Ebyte, en este caso debido a que el Gateway operaría a través de conexión ethernet se configuró estando conectado al dispositivo con el cual operaría, derivado de lo anterior no fue posible realizar la configuración mediante la descarga del software ya que se trabajó con la tarjeta Raspberry Pi la cual utiliza Raspbian como sistema operativo y Ebyte no proporciona un software ejecutable para este sistema operativo, por ello la configuración debe realizarse en línea dentro de la Raspberry Pi pues ésta permite acceder a sitios web a través de la conexión WiFi con la que sí cuenta para conectarse a la red.

Debido a lo anterior se comenzó a trabajar con la Raspberry Pi, inicialmente se configuró la tarjeta de desarrollo con el sistema operativo Raspbian y posteriormente para poder conectar con el sitio web de configuración en línea del Gateway se modificó la IP estática de la red “Eth0” de la tarjeta Raspberry. Para ello se conectó el Gateway con un conector de tipo ethernet a la tarjeta Raspberry Pi, y se procedió a modificar el archivo “dhcpcd” a través del comando: “sudo nano /etc/dhcpcd” en consola, y dentro del cual se retiró de comentario las líneas correspondientes a la configuración de la red ethernet como se indica en la Figura 7, la cual muestra el archivo indicado anteriormente dentro de la consola del sistema operativo de la tarjeta Raspberry Pi 3B (Raspbian).

Una consideración de suma importancia radica en conectar la antena al Gateway antes de encenderlo y de empezar este proceso para evitar dañar el equipo.

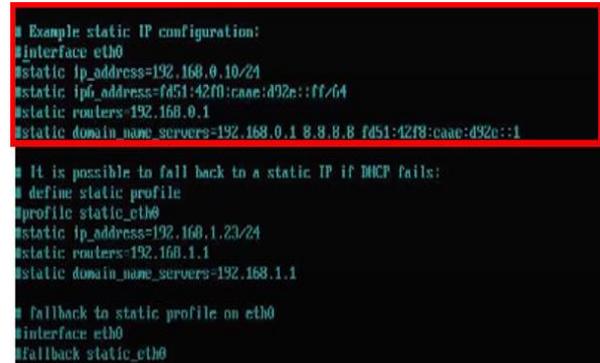


Figura 7: Configuración de IP estática de la tarjeta Raspberry Pi.

Dentro de la configuración ethernet del archivo ya mencionado se cambió la dirección ethernet por la siguiente: 192.168.4.100, esta selección se realizó teniendo en cuenta que es una dirección IP adecuada para establecer conexión con el Gateway, ya que este tiene asignada la dirección IP 192.168.4.101, y para garantizar la conexión entre ambos deben coincidir al menos los primeros 8 dígitos de la dirección IP. De igual manera por indicaciones del fabricante fue necesario modificar la máscara subnet, la cual tuvo que ser la dirección 255.255.255.0, y como indicativo para configurarla bajo esta dirección se adicionó el número 24 a la IP ethernet de la siguiente manera: 192.168.1/24.

Cuando se modificó la IP ethernet de la tarjeta Raspberry (manteniendo la conexión física vía ethernet de la tarjeta Raspberry y el Gateway) se abrió el navegador y en él se escribió la dirección IP del Gateway, que es: 192.168.4.101, y redirigió al sitio de configuración en línea. A continuación, se muestra la sección de parámetros a configurar.

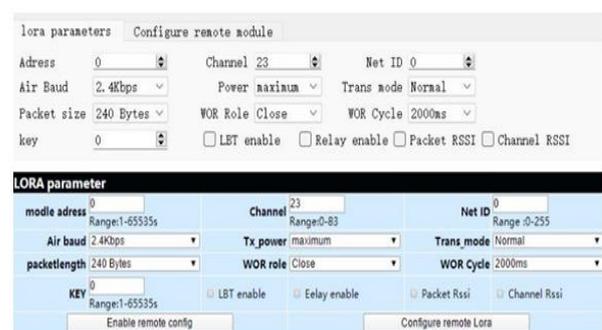


Figura 8: Configuración de parámetros de tipo LoRa para el Gateway E90 DTU de Ebyte.

Dentro de dicha configuración solo se ajustaron algunos parámetros; en primer lugar, se modificó el canal, en donde se colocó el 65 para hacerlo coincidir con el canal del módulo E220-900T22D.

Además, en la sección de Address y Key se mantuvo en 0 ambos parámetros de igual manera para hacerlos coincidir con la configuración del módulo de comunicación del nodo.

5.2 Comunicación del Gateway E90-DTU con el servidor Eclipse Mosquitto

Antes de cerrar la configuración en línea del Gateway también se modificaron otros parámetros que hicieron posible la comunicación con el servidor implementado de la plataforma Eclipse Mosquitto. Para ello dentro de la misma configuración en el apartado de “Network Parameter” se selecciona el modo “TCP server”, derivado de que el Gateway es el dispositivo receptor de información y es el indicado para publicar dicha información recibida en un tópico dentro del servidor Mosquitto, se dejó el puerto local en 8886.

Network parameter			
DHCP	disable	Work mode	TCP server
Local IP	192.168.4.101	Local port	8886
MASK	255.255.255.0	Gateway	192.168.4.1
Target IP	192.168.4.100	Web port	80
		DNS	114.114.114.114
		Target port	8887
		MAC	84-C2-E4-9F-10-AC

Figura 9: Configuración de red para conectar el Gateway al servidor Mosquitto.

Debido a la selección de “TCP server” como modo de funcionamiento en la parte inferior de la pantalla de configuración surgió un apartado adicional donde se introdujo como IP la dirección del servidor Mosquitto que es: 127.0.0.1, mientras que en puerto se colocó “1883”, ya que estos son los parámetros generales para dicho servidor. En cuanto al tópico se escribió el siguiente: “prueba/lora/nueva”, fue de suma importancia reservar esta dirección o nombre pues con ella se creó el tópico al cual se suscribió el Gateway para que publique en este apartado. Finalmente se fijaron los parámetros y el software online solicitó una contraseña que por default es “123456”.

Para poder concluir el proceso de comunicación entre el Gateway y el servidor se implementó un cliente MQTT a través de un código en Python 3 teniendo como eje principal la librería “paho.mqtt.client” que aplica internamente del código sockets para lograr recibir la información que el Gateway publicó en el tópico “prueba/lora/nueva” y así poder visualizarla cuando dicho código se ejecute a través de consola o autónomamente al iniciar la tarjeta Raspberry Pi.

Las consideraciones que se tuvieron al implementar el cliente MQTT fueron las siguientes:

- La dirección de host fue la correspondiente a la dirección del servidor Mosquitto: '127.0.0.1'.
- El puerto de igual manera tuvo que corresponder con el del servidor Mosquitto y el configurado en el Gateway que fue 18883.
- El tópico al cual se suscribió fue: 'prueba/lora/nueva', que debía corresponder con aquel colocado en la configuración del Gateway
- El Quos seleccionado fue 2

5.3 Alimentación del sistema de recepción

Como bien se mencionó, se implementó la alimentación de tipo POE (Power Over Ethernet) con el objetivo de extender la conexión y permitir la instalación del Gateway en exteriores dejando a la tarjeta Raspberry Pi en interiores o dentro de zonas donde pusiera conectarse a la red WiFi para acceder al servidor como cliente, no obstante, para la implementación del POE no se realizó directamente, sino que se realizó el siguiente circuito empleando los siguientes materiales:

- Inyector POE del fabricante TP-Link.
- Inyector POE de tipo Ubiquiti.
- Módulo convertidor DC-DC LM2596.

Las conexiones se realizaron como se muestra a continuación. Ver Figura 10.



Figura 10: Conexión de dispositivos para implementación del POE.

El funcionamiento de las conexiones presentadas radica en alimentar al inyector Ubiquiti de corriente Alterna en el mismo sitio donde se ubique la tarjeta Raspberry Pi la cual estará conectada a él mediante ethernet por el puerto LAN del inyector, mientras que del puerto POE se tomó un cable de alimentación de longitud de 15 metros para el inyector TP-link, el cual se encuentra ubicado en el mismo sitio donde se instaló el Gateway con su antena, el inyector TP-link es el encargado de alimentar al Gateway, no obstante dicho inyector tiene una salida de 24 volts, y pese a que por indicaciones de fabricante el Gateway soporta esa cantidad como máximo, y para evitar dañar el sistema se prefirió alimentarlo con una cantidad intermedia de voltaje dentro del rango de alimentación que soporta el Gateway que es de 8 a 24 volts, Para ello la salida DC del inyector TP-link se vinculó a un convertidor LM2596 con el cual se reguló el voltaje a 8.6 v cantidad que después de realizar pruebas de alimentación resultó ser la magnitud mínima aceptable para una correcta operación, mientras que para vincular la conexión ethernet de la tarjeta Raspberry con el Gateway, el puerto Ethernet del inyector TP-link se conectó al puerto ethernet del Gateway.

6. Implementación del sistema

Para implementar el sistema, en el caso del sistema de transmisión a la celda solar se le adicionó un soporte reclinable a base de tubo de tipo PVC, y por debajo de este se fijó en una carcasa de base plástico y cobertura de acrílico donde se instaló

internamente el sistema embebido diseñado para la recopilación y transmisión de información. El soporte adicional permite que el sistema de transmisión sea portable.

Por otra parte, está el sistema receptor instalado de manera fija. Para la parte del Gateway y su sistema de alimentación (que abarca el inyector Tp-link y el convertidor DC-DC LM2596) se instalaron en un contenedor para exteriores dentro del cual dichos componentes se fijaron a través de un retenedor rectangular generado por impresión 3D con dimensiones coincidentes en largo y ancho al contenedor para exteriores y con unas rejillas a los costados que permitían el ensamblaje mediante unas extrucciones internas del contenedor.



Figura 11: Instalación del Gateway en chasis para exteriores.

Al chasis se realizaron modificaciones, entre ellas unas perforaciones en la parte inferior para el paso de los cables ethernet-POE de alimentación del inyector y para la salida del cable de la antena del Gateway, que debía instalarse en el exterior. La instalación de este sistema se realizó en la parte superior del edificio como se muestra en la Figura 11.



Figura 12: Instalación del sistema para el Gateway en el exterior.

Por otra parte, la tarjeta Raspberry Pi y el Inyector Ubiquiti se ubicaron de manera interna en el edificio, teniendo la ventaja que el cable de 15 metros de longitud dirigido al puerto POE del inyector permite montar y desmontar la tarjeta, es decir permitió la portabilidad de esta última parte.

7. Resultados y discusión.

Las pruebas de comunicación realizadas, implementando el sistema receptor con Gateway y el sistema embebido diseñado para obtener y transmitir variables ambientales se realizaron inicialmente con una variable temperatura, y se hicieron a 271.55 m, se recibieron mediciones de temperatura eficientemente.



Figura 13: Sistema embebido para transmisión de variables ambientales. Instalación.

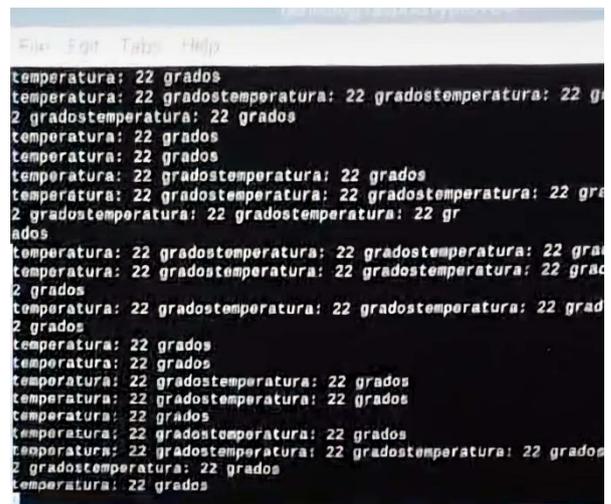


Figura 14: Recepción de información en el servidor.

En la figura 15 se puede ver de manera gráfica las ubicaciones, trayecto y distancia aproximada entre la cual ocurre el proceso de transmisión-recepción de información con el sistema desarrollado.



Figura 15: Longitud del trayecto recto de comunicación.

Como se observa en los resultados, el alcance obtenido en las pruebas más recientes realizadas es de 271.55 m aproximadamente. Acorde a [Figueiredo, 2024], en el trabajo

que presentó en ciencia viva en conjunto de la fundação luso americana para o desenvolvimento, se implementaron sistemas modulares que permitan identificar fuentes de contaminación a través de mediciones las cuales se enviaron con el módulo LoRa E220 a un Gateway para subir la información a la web. El alcance obtenido fue de 400 metros realizando la transmisión entre el colegio Ribadouro y la Rua de Santa Catarina – Porto, Portugal, la cual es un área urbanizada y el trayecto de transmisión posee edificaciones continuamente [Figueiredo, 2024]. Por otra parte, [Amir, 2024], en pruebas realizadas para un proyecto de acciones de conservación de ecosistemas acuáticos realizado con la Universidad Muhammadiyah Parepare, Indonesia, indicó un alcance de 500 metros en la transmisión de mediciones de parámetros oceanográficos con retrasos entre 2 y 10 segundos en transmisión empleando el módulo LoRa E220.

Comparando los alcances obtenidos en otros lugares, se puede decir que la distancia conseguida en este trabajo se encuentra dentro de la escala de los trabajos mencionados, cabe destacar que si bien existe una diferencia entre 129 y 229 metros de longitud en el alcance de transmisión, no es un parámetro estático, ya que la distancia de 271 metros fue lo que se obtuvo hasta las últimas pruebas, las cuales se realizaron dentro de las fronteras locales de la institución y no externamente a pie por condiciones geográficas e intensidad de radiación solar, no obstante en próximas pruebas se pretende verificar el alcance de la transmisión con el nodo que posee el módulo LoRa E220, dentro de un vehículo en movimiento desde el edificio 5 de la UPIIH, San Agustín Tlaxiaca, Hidalgo, México, hasta la entrada de la ciudad del conocimiento que es una distancia de 1963.74 metros. Ahora bien, en el caso de las pruebas realizadas en Portugal por [Figueiredo, 2024], se menciona un alcance de 400 metros en una zona urbana con edificaciones continuas, con lo cual se puede ver que este trabajo presenta una fortaleza para una transmisión optimizada, pues la zona para siguientes pruebas es un sitio parcialmente aislado sin un gran número de edificaciones continuas, por lo que se podría tener un alcance superior extendiéndolo a la carretera Actopan-Pachuca y posteriormente al Boulevard del minero en la ciudad de Pachuca, Hidalgo, ya que la distancia a ellos es de 5,000 a 7,000 metros, como se muestra en la Figura 16, sin superar aún el alcance del módulo Ebyte E220. Por otro lado, como parte del trabajo futuro, se contempla la implementación de una interfaz amigable para la visualización de datos y la integración de inteligencia artificial con el objetivo de facilitar la toma de decisiones informadas.

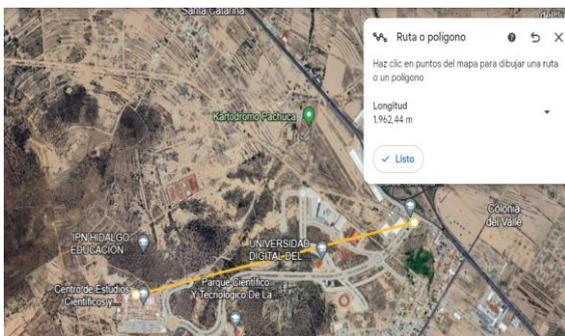


Figura 16: Distancia entre la UPIIH y Ciudad del conocimiento.



Figura 17: Distancia entre UPIIH y carretera Pachuca-Actopan.

8. Conclusiones y trabajo futuro

El sistema desarrollado permite la recolección de datos como la presión y la temperatura ambiental a través de una comunicación inalámbrica utilizando tecnología LoRa, conocida por su largo alcance y bajo consumo energético. Además, integra un sistema de celda solar y baterías que garantizan su autonomía durante todo el día. Los datos recopilados por el Gateway y enviados a un servidor permiten visualizar la información, lo que resulta especialmente beneficioso para áreas remotas o de difícil acceso. Como parte del trabajo futuro, se contempla la implementación de una interfaz amigable para la visualización de datos y la integración de inteligencia artificial con el objetivo de facilitar la toma de decisiones informadas, además se pretende continuar con la realización de nuevas pruebas para extender el alcance logrado que fue de 300 metros aproximadamente.

Referencias

- Amir A. Oceanographic Parameter Measurement System Based on LoRa Communication Module, JITE (Journal of Informatics and Telecommunication Engineering), Vol. 7 No. 2, 2024, Parepare, Indonesia. DOI : 10.31289/jite.v7i2.10855
- Dinesh, G., Gupta, A. K., Nagaseshireddy, M., Prasanna, P. D., Varshini, M. S., & Gowtham, K. LoRa - Powered Smart Agriculture System for Monitoring and Controlling. In 2024 IEEE Wireless Antenna and Microwave Symposium (WAMS), 1-6. Visakhapatnam, India, 2024 <https://doi.org/10.1109/WAMS59642.2024.10528095>
- Edwin, et al.. LoRa System with IOT Technology for Smart Agriculture System. In 2022 IEEE 20th Student Conference on Research and Development (SCORED), 39-44. Bangi, Malaysia, 2022. <https://doi.org/10.1109/SCORED57082.2022.9974084>
- Figueiredo A. Proyecto Guarda-Rios, Ciencia viva-fundação luso americana para o desenvolvimento, Junior Atlântico, 28-30, Porto, Portugal, 2024. <https://webstorage.cienciaviva.pt/public/pt.cienciaviva.io/cms/files/2XLrPM01ZqVbGRc3Cn.pdf>
- Gaitán, N. C., & Hojibota, P. Forest Fire Detection System using LoRa Technology, International Journal of Advanced Computer Science and Applications (IJACSA), vol. 11, núm. 5, 2020. DOI: 10.14569/IJACSA.2020.0110503.
- Haxhibeqiri, J., De Poorter, E., Moerman, I., & Hoebeke, J. A Survey of LoRaWAN for IoT: From Technology to Application. Sensors, 18(11), 3995, 2018. <https://doi.org/10.3390/s18113995>.
- Ji, M., Yoon, J., Choo, J., Jang, M., & Smith, A. LoRa-based Visual Monitoring Scheme for Agriculture IoT. In 2019 IEEE Sensors Applications Symposium (SAS), 1-6, Sophia Antipolis, France, 2019. <https://doi.org/10.1109/SAS.2019.8706100>
- Moore C., Meacham-Hensold K., Lemmonier P., Slatery R., Benjamin C., Bernacchi C., Lawson T., Cavanagh K., "The ecological importance of the accuracy of environmental temperature measurements." *Journal of Experimental Botany*, 72(8), 2822-2835. <https://academic.oup.com/jxb/article/72/8/2822/6146810>

- Rosen, M. A. (2012). "Engineering Sustainability: A Technical Approach to Sustainability." *Sustainability*, 4(9), 2270-2292. <https://doi.org/10.3390/su4092270>
- Singh, S., & Sharma, A. A comprehensive review on LoRa implementation in smart applications. *AIP Conference Proceedings*, 2516(1), 140001, 2023. <https://pubs.aip.org/aip/acp/article/2516/1/140001/2828038/A-comprehensive-review-on-LoRa-implementation-in>.
- Sulaiman, N., & Abdulmalek, S. A Survey on LoRaWAN Technology: Recent Trends, Opportunities, Simulation Tools and Future Directions. *Electronics*, 11(1), 164, 2022 <https://doi.org/10.3390/electronics11010164>.
- Yang, Y. Design and Application of Intelligent Agriculture Service System With LoRa-based on Wireless Sensor Network. In 2020 International Conference on Computer Engineering and Application (ICCEA) 712-716, Guangzhou, China. 2020. <https://doi.org/10.1109/ICCEA50009.2020.00155>
- Gunarathne, N., & Lee, K. H. (2021). "Critical environmental management accounting practices influencing service delivery of growing cities in a developing economy: a review and conceptual framework." *Environment Systems and Decisions*, 42(1), 29-45.