

Desarrollo de una plataforma IoT de bajo consumo y largo alcance con LoRaWAN E5 para la comunicación de variables en la agricultura Development of a low-power, long-range IoT Platform with LoRaWAN E5 for agricultural variable communication

D. Bautista-Vivanco ^{a, *}, L. Oliva-Moreno ^a, I. Ilizaliturri Flores ^a, O. Benítez-Rosas ^a, G. Amador-García ^a

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

Resumen

La agricultura, que aporta alrededor del 3 % al PIB de México y sustenta a muchas familias rurales, enfrenta nuevos retos que pueden ser abordados mediante tecnologías IoT aplicadas a la agricultura inteligente. No obstante, las redes inalámbricas convencionales limitan la cobertura y el despliegue de IoT en áreas agrícolas. Las redes de área amplia y bajo consumo (LPWAN), como LoRaWAN, ofrecen una solución al integrar funciones de sensado y comunicación a largas distancias con bajo consumo energético. Sin embargo, prolongar la vida útil de los nodos de sensado a través de una mayor eficiencia energética es un desafío. En este contexto, este trabajo propone una arquitectura de nodo embebido compacta y altamente personalizable, desarrollada mediante la integración directa del firmware LoRaWAN en lenguaje C dentro del microcontrolador STM32WLE5JC del módulo LoRa-E5. El sistema implementa sensores de temperatura y humedad de suelo gestionados sin microcontroladores adicionales, diferenciándose de las soluciones comerciales basadas en comandos AT al ofrecer control total del hardware y la posibilidad de ampliar el número de variables medidas y su transmisión hacia The Things Network (TTN). Además, se incorporó una estrategia de bajo consumo que activa los sensores únicamente durante la lectura. Las pruebas de campo alcanzaron un rango de hasta 5.3 km, validando su aplicabilidad en entornos agrícolas de difícil acceso.

Palabras Clave: LoRaWAN, Sistema embebido, Sensores, The Things Network, Sistemas de bajo consumo energético.

Abstract

Agriculture, which contributes approximately 3% to Mexico's GDP and supports many rural families, faces new challenges that can be addressed through IoT-based smart farming technologies. However, conventional wireless networks limit the coverage and deployment of IoT in agricultural areas. Low Power Wide Area Networks (LPWAN), such as LoRaWAN, provide a solution by integrating long-range sensing and communication capabilities with low energy consumption. Nevertheless, extending the operational lifetime of sensing nodes through improved energy efficiency remains a challenge. In this context, this work proposes a compact and highly customizable embedded node architecture, developed by directly integrating the LoRaWAN firmware written in C language into the STM32WLE5JC microcontroller of the LoRa-E5 module. The system implements soil temperature and humidity sensors managed without additional microcontrollers, distinguishing it from commercial AT-command-based solutions by offering full hardware control and the ability to expand the number of measured variables and transmit them to The Things Network (TTN). Furthermore, a low-power strategy was implemented, activating the sensors only during measurement cycles. Field tests achieved a communication range of up to 5.3 km, validating its applicability in remote agricultural environments.

Keywords: LoRaWAN, Embedded system, Sensors, The Things Network, Low-power systems.

1. Introducción

La adopción de tecnologías agrícolas inteligentes ha cobrado mayor relevancia en los últimos años, no solo como parte natural del avance tecnológico en el sector, sino como

respuesta urgente a desafíos globales cada vez más complejos. La innovación tecnológica en la agricultura se impulsa por necesidad de garantizar la seguridad alimentaria ante el crecimiento poblacional. El Fondo Monetario Internacional estima que para 2050 será necesario aumentar la producción de

*Autor para la correspondencia: dbautistav1901@alumno.ipn.mx

Correo electrónico: dbautistav1901@alumno.ipn.mx (Denisse Yemirel Bautista-Vivanco), loliva@ipn.mx (Luz Noe Oliva-Moreno), iflores@ipn.mx (Ian Ilizaliturri Flores), obenezr2000@alumno.ipn.mx (Obed Misraim Benítez-Rosas), gamadorg1500@alumno.ipn.mx (Giovanny Guadalupe Amador-García)

alimentos en un 70 %. (Arezki, 2017). En este contexto, las soluciones basadas en Internet de las Cosas (IoT) y en tecnologías de comunicación de largo alcance y bajo consumo como LoRaWAN y los sistemas que surgen con dicha tecnología como este trabajo, representan una alternativa clave para optimizar la producción agrícola, facilitar el monitoreo remoto de cultivos y mejorar la eficiencia en entornos rurales con limitaciones de conectividad.

Ante los desafíos globales como el crecimiento poblacional, la escasez de recursos naturales y la variabilidad climática, la Organización Internacional de Normalización (ISO) destaca el papel transformador de la agricultura inteligente, también conocida como agricultura digital. Esta estrategia aprovecha tecnologías como sensores IoT, drones, robótica y sistemas de gestión agrícola basados en datos para mejorar la eficiencia y sostenibilidad de la producción. Gracias al uso de datos estandarizados y herramientas interoperables, es posible tomar decisiones más informadas, reducir el uso de insumos, mitigar impactos ambientales y aumentar la resiliencia del sector agrícola. La ISO enfatiza que estas prácticas permiten "producir más con menos", contribuyendo tanto a la seguridad alimentaria como a la restauración de los ecosistemas. Así, la agricultura inteligente no solo moderniza el campo, sino que también se perfila como una vía esencial para alcanzar sistemas alimentarios sostenibles, inclusivos y adaptados al cambio climático. (ISO, 2024)

El Internet de las Cosas (IoT, por sus siglas en inglés) desempeña un papel central en la agricultura inteligente al facilitar el monitoreo continuo de variables ambientales, la automatización de procesos y la toma de decisiones basada en datos de monitoreo preciso. Mediante sensores distribuidos en el terreno, es posible medir parámetros como humedad del suelo, temperatura, nivel de luz, entre otros, lo cual permite una gestión más eficiente de los recursos hídricos, energéticos y agrícolas. Al integrar IoT, los agricultores pueden optimizar el riego, aplicar fertilizantes de forma precisa y anticipar condiciones adversas, logrando una mayor productividad con un menor consumo de insumos. Esta capacidad de producir más con menos recursos contribuye significativamente a la sostenibilidad ambiental y a la seguridad alimentaria (Sjaak Wolfert, 2017)

La toma de decisiones fundamentadas en el sector agrícola es esencial para mantener la competitividad entre los actores del mercado. Sin embargo, esta toma de decisiones depende en gran medida de la disponibilidad y calidad de la información. Cuando no se cuenta con datos precisos o actualizados, se pueden generar impactos negativos en los ciclos de producción, afectando la eficiencia y la rentabilidad del sistema agrícola (López Díaz, 2021)

El uso de tecnologías IoT en la agricultura inteligente permite una recolección de datos en tiempo real que mejora la toma de decisiones y optimiza el uso de recursos críticos como el agua y fertilizantes. Una arquitectura basada en sensores conectados a través de redes inalámbricas facilita el monitoreo continuo del entorno agrícola, lo cual impacta positivamente en la productividad y sostenibilidad del sistema. Además, la automatización habilitada por estas tecnologías reduce la

intervención manual, mejorando la eficiencia y disminuyendo costos operativos. (Suwaid, 2019)

A pesar del gran potencial del IoT en el sector agrícola, su implementación en zonas rurales enfrenta desafíos significativos debido a la limitada cobertura de redes celulares o Wi-Fi, las cuales demandan infraestructura costosa y cercana, además de un elevado consumo energético que restringe su uso en entornos con disponibilidad limitada de energía. En este contexto, las redes de área amplia y bajo consumo (LPWAN) como LoRaWAN (Long Range Wide Area Network) han emergido como una solución ideal. LoRaWAN permite la comunicación inalámbrica a largas distancias (hasta varios kilómetros) con un consumo energético extremadamente bajo, lo que lo hace ideal para sensores remotos alimentados por batería. Además, esta tecnología opera en bandas de frecuencia libres, lo que reduce costos y facilita su adopción en entornos rurales o de difícil acceso. Gracias a su arquitectura de bajo consumo y gran alcance, LoRaWAN es una pieza clave para habilitar aplicaciones agrícolas basadas en IoT, permitiendo el monitoreo y control de cultivos en tiempo real sin necesidad de infraestructura de red compleja.

Las redes de área amplia y bajo consumo (LPWAN), como LoRaWAN (Long Range Wide Area Network), han surgido como una alternativa eficaz para habilitar aplicaciones de IoT en entornos agrícolas donde no existe infraestructura de red convencional. Esta tecnología permite la transmisión de datos a distancias que superan los 5 km en zonas rurales, con un consumo energético muy reducido, lo que resulta ideal para dispositivos alimentados por baterías que deben operar durante años sin mantenimiento. Además, LoRaWAN utiliza bandas de frecuencia sin licencia, lo que disminuye los costos operativos. Gracias a estas características, LoRaWAN permite implementar soluciones escalables y sostenibles para el monitoreo de cultivos, condiciones ambientales o sistemas de riego automatizados, promoviendo una agricultura más eficiente y resiliente (M. Centenaro, 2016)

Una de las estrategias utilizadas para extender la cobertura de redes LoRaWAN en entornos rurales o agrícolas es el uso del modo "relay", que permite retransmitir datos desde nodos distantes a través de nodos intermedios. No obstante, este enfoque conlleva un aumento significativo en el consumo energético. (P. Maurya, 2024) demostraron que el modo relay puede duplicar el consumo energético en nodos operando con SF7, e incrementarlo hasta diez veces con SF12, en comparación con el modo estándar. Estos hallazgos refuerzan la necesidad de soluciones más eficientes en el uso de energía para aplicaciones agrícolas, especialmente en sistemas autónomos alimentados por batería.

En contextos agrícolas remotos o rurales, donde la infraestructura de red es limitada, tecnologías como LoRaWAN juegan un papel clave al proporcionar conectividad de largo alcance con bajo consumo energético. Según lo demostrado por recientes implementaciones experimentales, los sistemas de monitoreo ambiental basados en LoRa permiten capturar variables como humedad, temperatura y nivel de agua con alta eficiencia, garantizando la integridad de los datos y la operatividad autónoma del sistema durante largos

periodos (Jackulin, 2025). Esto valida su utilidad en aplicaciones agrícolas inteligentes enfocadas en sostenibilidad y bajo costo.

A pesar de los avances en la implementación de redes LoRaWAN en la agricultura inteligente, muchos nodos comerciales disponibles en el mercado presentan limitaciones importantes en cuanto a su flexibilidad. Estos dispositivos suelen operar con un firmware cerrado que únicamente permite configurar parámetros de red mediante comandos AT, lo cual restringe considerablemente la capacidad del usuario para adaptar el sistema a requerimientos específicos. En estos casos, la incorporación de nuevos sensores o la transmisión de múltiples variables ambientales no es posible directamente, ya que el firmware no permite modificar la estructura del paquete de datos ni integrar nuevas rutinas de adquisición. Como consecuencia, se requiere un microcontrolador puente que lea los sensores y envíe los datos al módulo LoRa mediante UART, lo cual incrementa el consumo energético, el costo y la complejidad del sistema. En contraste, un enfoque basado en firmware personalizado en lenguaje C que integre directamente la pila LoRaWAN permite la adición de múltiples sensores, personalización del protocolo de comunicación y una mejor gestión del consumo energético sin necesidad de hardware adicional.

En esta primera fase, la “plataforma IoT” se centra en el desarrollo y validación del nodo embebido basado en el módulo LoRa-E5, responsable de la adquisición y transmisión de variables ambientales a través de la red LoRaWAN. Si bien el término plataforma abarca conceptualmente la arquitectura completa de comunicación, desde el nodo hasta la visualización de datos, el presente trabajo aborda únicamente la capa de sensado y transmisión. Las capas de gestión de datos, almacenamiento en la nube y visualización mediante dashboards se consideran parte de fases de desarrollo futuras dentro del mismo ecosistema.

2. Arquitectura del sistema

La propuesta central de este trabajo radica en el desarrollo de un nodo transmisor personalizado y extensible, diseñado a partir de un firmware en lenguaje C que permite al usuario adaptar fácilmente la cantidad y tipo de datos a transmitir, sin las limitaciones propias de los firmwares comerciales basados en comandos AT. Al utilizar una pila LoRaWAN de código abierto compatible con la arquitectura del microcontrolador, el sistema ofrece flexibilidad, autonomía y escalabilidad, cualidades esenciales para aplicaciones agrícolas en constante evolución.

El nodo propuesto se compone de tres elementos principales. El primero y más relevante es el chip LoRa-E5 HF, el cual integra el microcontrolador STM32WLE5JC y el transceptor SX1262 de Semtech. Esta variante del chip es la única compatible con la implementación del firmware en lenguaje C que contiene la pila LoRaWAN, ya que la versión LoRa-E5-LE-HF presenta limitaciones que impiden su funcionamiento con dicho stack. En el sistema desarrollado, el LoRa-E5 HF gestiona tanto la

activación de sensores como la recolección de variables ambientales, en este caso temperatura y humedad del suelo. La activación se realiza mediante señales digitales que controlan MOSFETs, los cuales permiten energizar los sensores únicamente durante el instante de medición, optimizando así el consumo energético.

Una vez obtenidas las lecturas, el microcontrolador procesa y encripta los datos a través de la pila LoRaWAN y gestiona el proceso de unión a la red utilizando las claves e identificadores definidos. Posteriormente, los datos se transmiten al Gateway UG67 de Milesight, que actúa como puente hacia la red TTN (The Things Network). Finalmente, el usuario puede visualizar en la plataforma TTN los mensajes recibidos desde el nodo, inicialmente en formato hexadecimal, verificando con ello la correcta comunicación de extremo a extremo. En la figura 1 se puede observar el diagrama a bloques que representa el flujo de trabajo entre los elementos del sistema, de igual manera en la tabla 1 se mencionan los sensores integrados que abarcan humedad y temperatura del suelo, así como los protocolos de comunicación y periféricos necesarios para su implementación.

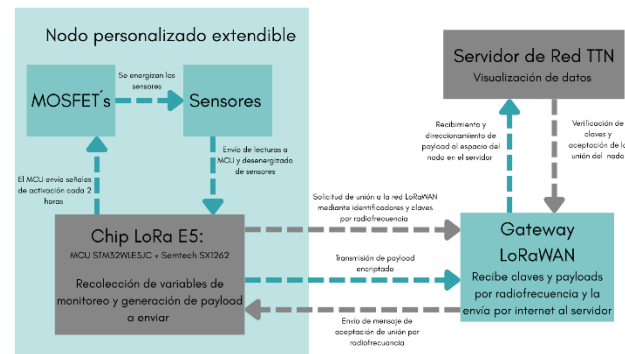


Figura 1: Diagrama de funciones del diseño del sistema

Tabla 1: Componentes que integran el nodo propuesto

Componente	Función	Protocolo de comunicación	Periférico utilizado
Chip LoRa E5	Recolección y envío de datos	LoRa	No aplica
DS18B20	Sensado de temperatura	One-Wire	GPIO
SEN-HS-CAP	Sensado de humedad	ADC	ADC
MOSFET	Conmutación para energizado de sensores	Digital	GPIO

2.1 Chip LoRa E5

El desarrollo de este sistema se fundamenta en la implementación del módulo LoRa-E5, el cual se puede observar en la figura 1 e integra el microcontrolador STM32WLE5JC de STMicroelectronics y el chip de radiocomunicación SX1262 de Semtech en un solo encapsulado. Esta integración reduce el número de

componentes, simplificando el diseño del hardware al requerir menos conexiones y ocupar menos espacio. La selección de este módulo se basó, en primer lugar, en la disponibilidad de una pila LoRaWAN en lenguaje C totalmente compatible con la arquitectura del STM32WLE5JC, lo que permite un desarrollo embebido completo sin depender de firmware AT ni de microcontroladores intermedios.

El SX1262, por su parte, ofrece una transmisión robusta en bandas sub-GHz, alcanzando hasta 10 km en condiciones de campo abierto, con un excelente desempeño en sensibilidad de recepción (~ -148 dBm) y una eficiencia energética destacable, ideal para aplicaciones en zonas rurales. Adicionalmente, el módulo LoRa-E5 cuenta con certificaciones CE, FCC y RoHS, lo cual respalda su confiabilidad para aplicaciones industriales y agrícolas. Su bajo consumo en modos de reposo, junto con su capacidad de operar en múltiples regiones LoRaWAN (incluyendo AS923 y US915), lo posicionan como la opción más adecuada para el desarrollo de soluciones escalables, energéticamente eficientes y de largo alcance en entornos agrícolas, como los abordados en este proyecto.

2.2 Sensores integrados en el nodo

Para el monitoreo de variables edáficas se integraron dos sensores con bajo consumo energético y alta compatibilidad con microcontroladores embebidos. El sensor DS18B20, encargado de la medición de temperatura, emplea el protocolo digital One-Wire, lo que permite una comunicación robusta y eficiente usando solo una línea de datos, ideal para aplicaciones donde se desea reducir el número de pines del microcontrolador utilizados. Este sensor ofrece una precisión de ± 0.5 °C en el rango de -10 °C a $+85$ °C, y permite lecturas digitales directas sin necesidad de etapas de conversión analógica, además de ser resistente al agua y encapsulable en acero inoxidable, lo que facilita su inserción directa en el suelo.

Por su parte, el sensor SEN-HS-CAP mide la humedad del suelo mediante un principio capacitivo y entrega su señal a través de una salida analógica, siendo así compatible con entradas ADC comunes. Este sensor destaca por su mayor durabilidad frente a sensores resistivos, ya que evita la corrosión al no tener contacto directo entre el suelo húmedo y superficies metálicas expuestas, lo que lo hace más adecuado para entornos agrícolas de largo plazo. Su sencillez de lectura permite integrarlo sin requerir protocolos digitales adicionales, optimizando así el uso de recursos del microcontrolador. En conjunto, ambos sensores ofrecen un equilibrio entre precisión, resistencia ambiental y facilidad de integración, reforzando la funcionalidad del nodo propuesto para el monitoreo en campo.

2.3 Tarjeta preliminar para pruebas

Como etapa preliminar al diseño del nodo embebido personalizado, se empleó la tarjeta comercial Wio-E5 Mini de Seeed Studio, la cual integra el chip LoRa-E5 que se pretende utilizar en la arquitectura final. Esta plataforma facilitó la realización de pruebas de conectividad, verificación de pines disponibles y validación de funcionalidades básicas del hardware. Cabe destacar que este dispositivo incorpora por defecto un firmware comercial basado en comandos AT para unirse a redes LoRaWAN, el cual fue desinstalado con el propósito de obtener acceso directo al microcontrolador STM32WLE5JC. De esta manera, fue posible implementar directamente una pila LoRaWAN en lenguaje C, lo que permite el desarrollo de un sistema completamente personalizable y extensible. En la Figura 3 se muestra la tarjeta Wio-E5 Mini, que en su interior contiene tanto el microcontrolador STM32 de bajo consumo como el chip de radiofrecuencia SX1262 de Semtech.

2.4 Integración del nodo a una red LoRaWAN

La Figura 4 muestra la arquitectura del sistema propuesto para la integración de un nodo de monitoreo ambiental basado en el microcontrolador STM32WLE5JC con la red LoRaWAN mediante la plataforma The Things Network (TTN). El sistema se divide en tres bloques principales: nodo, middleware y backend de red. En el nodo, se realiza la recolección de datos mediante sensores de humedad y temperatura del suelo (1), cuya activación y lectura son gestionadas directamente por el firmware embebido (2), sin requerir un microcontrolador adicional. Posteriormente, el middleware se encarga de la conexión y transmisión (3), utilizando un firmware desarrollado en lenguaje C que integra la pila LoRaWAN. Esta implementación no solo permite configurar los parámetros de red (como DevEUI, AppEUI y AppKey), sino que también posibilita extender el número de sensores o variables a transmitir de manera flexible, favoreciendo la escalabilidad del nodo. La etapa de backend involucra la recepción de datos por medio de un gateway (4), el cual retransmite la información al servidor de red, donde se validan los datos y se generan claves de sesión (NwkSKey, AppSKey) en caso de una activación por OTAA (5). Finalmente, los datos son visualizados por la aplicación del usuario. Esta arquitectura facilita una comunicación eficiente, de bajo consumo y altamente personalizable, ideal para entornos agrícolas dinámicos donde las necesidades de monitoreo pueden evolucionar con el tiempo.

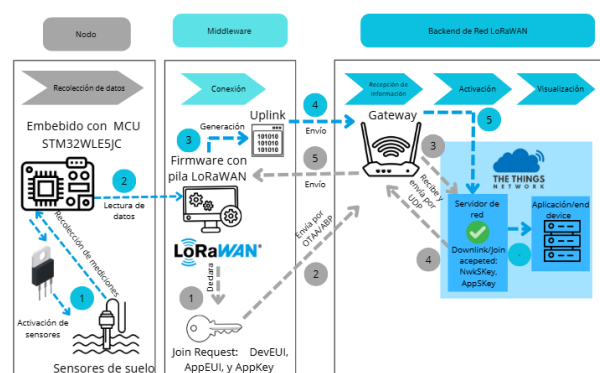


Figura 2: Integración del nodo propuesto en una red LoRaWAN, las flechas grises representan el primer flujo de información orientado al

proceso de unión, mientras que las flechas azules representan la transmisión de lecturas de sensorado.

3. Optimización de la librería

3.1 Arquitectura del firmware

Este firmware se encuentra compuesto por 5 directorios principales: Includes, directorio donde se realizan las Configuraciones de HAL y definiciones globales además de que ahí se encuentra la mayor parte del stack LoRaWAN, el segundo directorio nombrado “Application” contine la lógica principal del firmware y parte de stack LoRaWAN, por otra parte el directorio “Debug” contine configuraciones de debug además de los archivos para flasheo del MCU, mientras que el directorio “Drivers” se enfoca en los controladores de STM32 HAL (Hardware Abstraction Layer) que proporciona funciones de alto nivel que simplifican la interacción con el hardware + LL(Low-Layer) que ofrece un control más directo sobre los registros del MCU para operaciones de bajo nivel y configuraciones específicas, finalmente el directorio “Middleware” implementa el Stack LoRaWAN y ejecuta las dependencias para que funcione correctamente la transmisión de datos con encriptación. En la figura 5 se muestran los directorios principales del firmware.

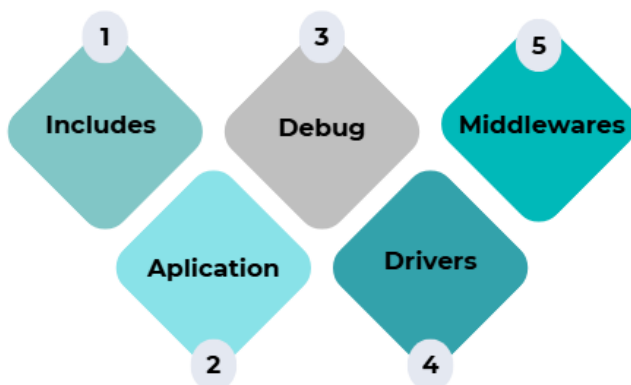


Figura 3: Directorios principales que conforman el firmware de la pila o stack LoRaWAN para el Chip LoRa E5.

3.2 Dependencias entre archivos del firmware

Como se mencionó en la sección anterior, la mayor parte de declaraciones de las variables para el stack de LoRaWAN se encuentran en el directorio “Includes”, sin embargo otro porcentaje del Stack se encuentra inmerso a través de los diferentes directorios, además de que se vincula directamente con las configuraciones del MCU y con las acciones que éste realice, por ejemplo, la lectura de variables, configuraciones para la unión a la red LoRaWAN y generación del paquete de envío, dado lo anterior, existen dependencias importantes entre archivos del firmware, lo cual se puede observar en la figura 6.

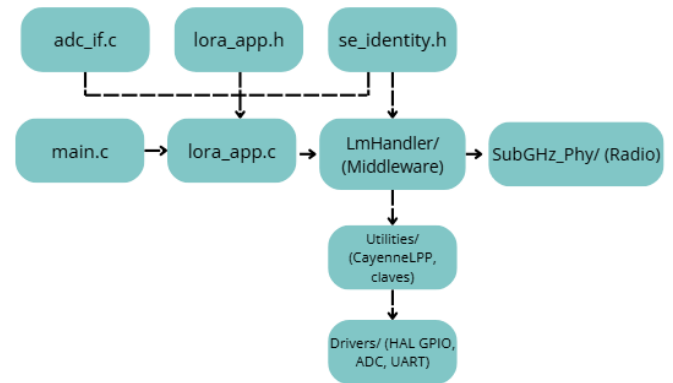


Figura 4: Dependencias principales entre archivos del firmware para el chip LoRa E5

La finalidad de esta dependencia de archivos es cubrir las capas que abarca el protocolo LoRaWAN, desde la capa física, la encriptación, generación de mensaje a transmitir, transmisión e inclusión de llaves para la descriptación cuando el mensaje llegue a su destino, que en este caso es TTN.

Algunos de estos archivos con dependencias son los que permiten la personalización del firmware y del sistema mediante su edición, proceso que a continuación se describe.

3.3 Archivos de personalización del sistema

Los archivos que permiten la adecuación del sistema son cuatro, dos de ellos se ubican en el directorio “Includes” abarcando declaraciones importantes orientadas a la configuración de parámetros de unión a la red LoRaWAN. Los dos archivos restantes se ubican en el directorio “Application” y se enfocan en llevar a cabo las lecturas de los sensores y generar con ello el mensaje a transmitir, esto se puede visualizar en la figura 7.

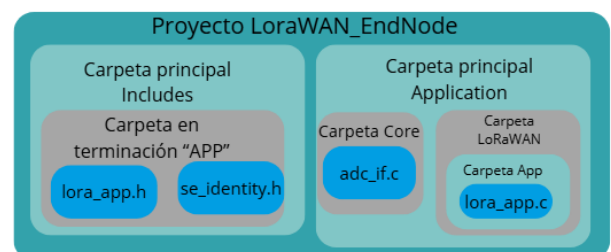


Figura 5: Archivos que permiten la personalización del sistema.

3.3.1 Archivos para personalización de parámetros de la red LoRaWAN

Estos archivos constituyen principalmente declaraciones para los parámetros de unión a la red LoRaWAN y son los siguientes.

- Se-identity.h:

Este archivo declara los identificadores únicos y claves criptográficas que permiten la unión segura del nodo con el servidor de red mediante el método OTAA (Over-The-Air Activation). En él se definen:

- DevEUI (Device Extended Unique Identifier): identificador único global del nodo, equivalente a un número de serie. Se envía al servidor al iniciar la solicitud de unión (Join Request) y puede ser definido por el usuario o el fabricante.
- JoinEUI o AppEUI: identificador de la aplicación o servidor de red que autoriza el acceso del nodo. Se transmite junto con el DevEUI durante el proceso de unión.
- AppKey: clave maestra de 128 bits compartida entre el nodo y el servidor, utilizada para generar de forma segura las claves de sesión durante la activación OTAA.
- NwkSKey (Network Session Key): clave de sesión que protege la integridad y autenticación de los mensajes entre el nodo y el servidor.
- AppSKey (Application Session Key): clave de sesión que cifra y descifra la carga útil (payload) de los mensajes, garantizando la confidencialidad de los datos del sensor.

La longitud de cada clave se detalla en la tabla 2.

Tabla 2: Claves de unión a la red LoRaWAN

Clave	Función	Longitud
DevEUI	Identificador único y global del nodo	64 bits (8 bytes)
JoinEUI	Identificador único de la aplicación	64 bits
AppKey	Clave compartida entre el nodo y el servidor	128 bits
NwkSKey (Network Session Key)	Clave de sesión para proteger la integridad y autenticación	128 bits
AppSKey (Application Session Key)	Clave de sesión que se usa para cifrar y descifrar el contenido de los mensajes	128 ts

- Lora_app.h:

Este archivo permite configurar la frecuencia de operación o de transmisión acorde a la zona geográfica en la que esté ubicado el nodo, para este caso se implementó la frecuencia de 915 MHz pues es la frecuencia determinada para américa, de igual manera se configura el ADR(Adaptative Data Rate) para fijar este parámetro a un valor estático o permitir que se adapte acorde al ambiente asignando un valor inicial. Finalmente

permite decidir al usuario implementar el modo de activación ABP (Activation by personalization) o el método OTAA (Over The Air Activation) el cual proporciona una mayor seguridad de cifrado al mensaje que se envía.

3.3.2 Archivos para adición de variables, sensores y extensión de mensaje de transmisión

Para poder extender el número de sensores y de variables en el nodo se deben intervenir dos archivos, el primero de ellos recibe el nombre de `adc_if.c`, este archivo, pese a que su nomenclatura conlleva un protocolo de comunicación en realidad no se encuentra limitado para incluir más configuraciones. `adc_if.c` es un código abierto cuya dependencia solo se observa para la generación del paquete de envío, por lo que es ideal para llevar a cabo la implementación de lecturas o acciones. Primeramente, en `adc_if.c` se deben iniciar y configurar los pines que se requieran acorde a los protocolos de comunicación de los sensores deseados o acorde a lo que se desea realizar, en este caso no solo se implementó el ADC sino que se configuraron pines digitales para el protocolo One Wire en conjunto de un pin para una salida digital de activación de los transistores. Posteriormente se realizan las mediciones y se procesa la información, estas etapas se pueden observar en la figura 6.

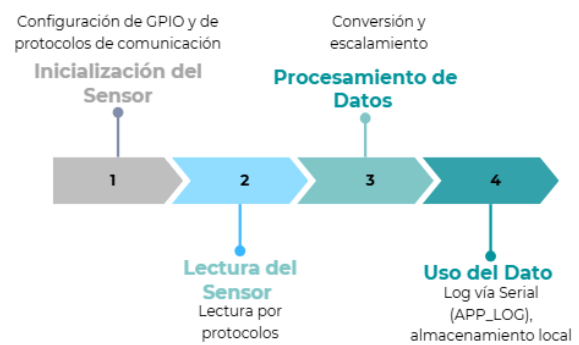


Figura 6: Etapas en el archivo `adc_if.c` para adición de variables.

Posteriormente, la información recabada de los sensores la retoma un archivo llamado `lora_app.c`, en donde con ello se genera el payload o mensaje a enviar gestionando directamente el buffer y a través del llamado de las funciones del stack para cifrar el mensaje. En la figura 7 se puede observar el proceso que ocurre en este espacio.

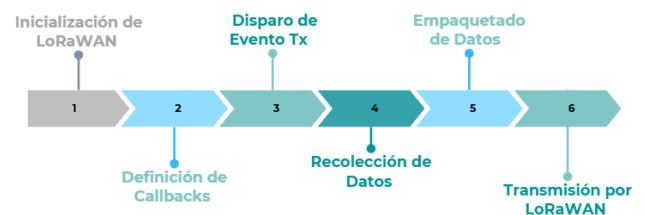


Figura 7: Etapas en el archivo `lora_app.c` para generar el mensaje de envío.

3.4 Restricciones y consideraciones para la personalización del sistema a través de la configuración del firmware

Si bien este firmware tiene la ventaja de ser un código abierto de libre acceso se deben tener en cuenta algunas restricciones para poder gestionar y adicionar sensores y acciones con el MCU dado que no es posible realizar algunas acciones debido a la interferencia con el stack o pila de LoRaWAN. En seguida se muestran algunas consideraciones identificadas para poder trabajar con el firmware sin generar errores o interferencias con la pila.

- Al adicionar sensores en el nodo, los pines de lectura de éstos o si se requieren pines salidas digitales, en ambos casos se debe realizar la declaración y la configuración de los pines y protocolos dentro del archivo `adc_if.c`, evitando el uso de la plataforma CubeMx dado que esto sobre escribe la declaración de los pines en lugares donde se generan interferencias con el stack de LoRaWAN y no será posible generar el archivo `.hex` para la puesta en marcha el nodo.
- Para selección de pines y su implementación en el nodo es importante revisar la documentación del chip LoRa E5 y verificar la disponibilidad y ubicación de ellos, además de revisar en el archivo `.ioc` visualizado a través de Cube Mx cuales son los pines restringidos por el stack.
- Para debug omitir el método convencional en lenguaje C denominado “scanf”, y utilizar el método “APP_LOG” implementado a lo largo del firmware.
- La pila o stack LoRaWAN abarcado en este firmware solo es posible implementarlo en el chip LoRa E5 HF, pero no es apto ni funcional en el chip LoRa E5-LE-HF, dado que requiere funciones de Ultra baja potencia no compatibles con el stack.

4. Integración del nodo propuesto a una red LoRaWAN

Para llevar a cabo la integración del nodo propuesto a la red LoRaWAN, se utilizó The Things Network (TTN) como backend de red, por ser una plataforma abierta y ampliamente adoptada para aplicaciones IoT. En la consola de TTN, se creó una aplicación y dentro de ella se registró un end device, que representa el nodo físico encargado de recolectar datos y transmitirlos mediante la red LoRa. El end device es un componente esencial en la arquitectura LoRaWAN, ya que encapsula los sensores, el microcontrolador y el chip de radiocomunicación necesarios para la transmisión de datos. Para que el proceso de activación por OTAA (Over-The-Air Activation) sea exitoso, es indispensable que las claves de autenticación (DevEUI, AppEUI y AppKey) configuradas en el nodo coincidan exactamente con las registradas en TTN. Además, para garantizar la recepción y reenvío de los paquetes a la red, dentro de la misma cuenta de TTN debe haberse

registrado previamente un gateway físico correctamente instalado y operativo en la ubicación del nodo, el cual actúa como puente entre el dispositivo y el backend de red.

Para iniciar la comunicación entre el nodo y TTN, es necesario generar el archivo hexadecimal del firmware y con ello programar el chip LoRa E5 mediante un software de depuración y programación de dispositivos. Posteriormente a través de una herramienta de puerto serial se observa el proceso de unión, primeramente, se visualizan las claves definidas, seguido de envíos de solicitudes de unión, el proceso requiere unos segundos para emparejar la frecuencia exacta entre el nodo y el sistema receptor. Cuando se logra el proceso de unión se observa la aceptación o “Join accepted” y se procede con el envío de mediciones como se observa en la figura 8.

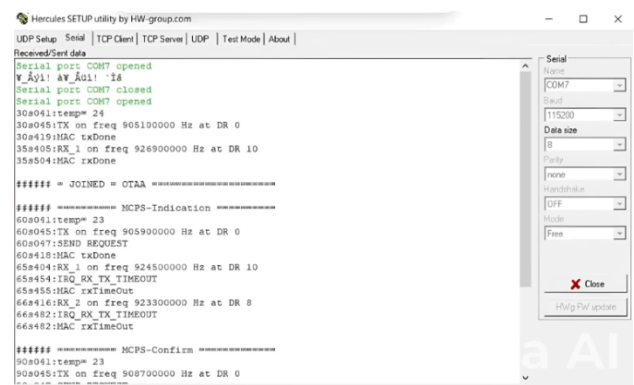


Figura 8: Visualización del proceso de unión del nodo en la herramienta serial

En la plataforma de The Things Network (TTN), una vez que el dispositivo ha sido registrado correctamente, la sección denominada “Live Data” permite observar los eventos de comunicación entre el nodo y la red LoRaWAN. Inicialmente, al energizar el nodo, se visualiza el mensaje de “Join Request”, el cual contiene los identificadores del dispositivo y la solicitud de acceso a la red. Si los identificadores y claves coinciden con los registrados en TTN, se genera y se envía un “Join Accept” como mensaje downlink, lo que indica que el servidor ha autorizado la unión del nodo a la red, etapa que sucede hasta antes de la visualización “Joined OTAA” en la figura 10. Posteriormente, se muestra la vinculación exitosa y los mensajes uplink, que contienen los datos enviados por el nodo, usualmente en formato hexadecimal. Esta visualización en tiempo real permite verificar tanto el establecimiento correcto de la sesión LoRaWAN como la transmisión efectiva de los datos desde el nodo al servidor de red, esta parte se puede observar en la figura 9, donde los datos enviados por el nodo corresponden a temperatura en formato hexadecimal, en nodo media entre el rango de 18 a 20°C, por lo que en TTN se muestra el par número cuatro de dígitos en formato hexadecimal de 12 a 14 que corresponde al intervalo de 18 a 20 en decimal.

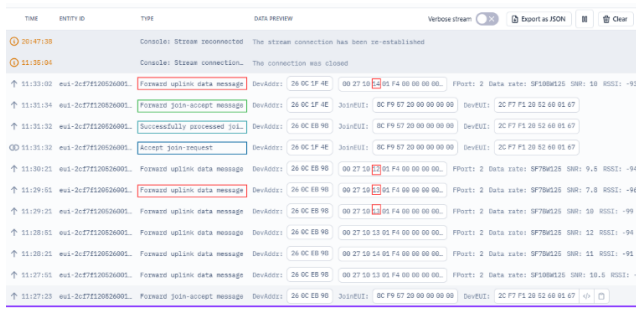


Figura 9: Visualización en la sección e “Live data” de TTN del proceso de unión (recuadros azules), aceptación (recuadro verde) y recibimiento de mensajes en formato hexadecimal de los mensajes enviados por el nodo (recuadros rojos).

5. Procedimientos de medición y recolección de datos

El procedimiento experimental consistió en la adquisición de variables ambientales mediante un nodo de sensado basado en el chip LoRa E5. Este nodo integró dos sensores: el DS18B20, encargado de medir la temperatura del suelo utilizando el protocolo digital One-Wire, y el SEN-HS-CAP v1.2, destinado a la medición de humedad a través de una lectura analógica por el convertidor ADC del microcontrolador STM32WLE5JC.

El firmware implementado activaba los sensores de forma periódica mediante transistores MOSFET controlados por pines GPIO, permitiendo su encendido únicamente durante la toma de datos para minimizar el consumo energético. Cada ciclo de adquisición generaba una lectura de temperatura y humedad que era empaquetada en formato hexadecimal y transmitida mediante el protocolo LoRaWAN hacia un gateway Milesight UG65, previamente registrado en The Things Network (TTN). La recepción de los paquetes y la correcta interpretación de los datos fueron verificadas en la sección *Live Data* de la plataforma TTN, asegurando la integridad y periodicidad de la comunicación nodo–gateway–servidor.

6. Análisis de datos

El análisis de datos se centró en validar la funcionalidad del firmware y la estabilidad del enlace de comunicación LoRaWAN. Se compararon las lecturas mostradas en la interfaz de TTN con las mediciones locales obtenidas en laboratorio, confirmando la coherencia entre ambas. Durante las pruebas de alcance realizadas en un entorno semiurbano con condiciones de obstrucción parcial, se observaron retardos promedio de transmisión entre **3 y 5 segundos**, manteniendo la recepción íntegra de los paquetes en distancias de hasta **5.3 km**. Estos resultados demuestran la efectividad del stack LoRaWAN implementado en lenguaje C, así como la capacidad del sistema embebido para transmitir variables ambientales de manera confiable a largas distancias y con bajo consumo de energía.

7. Limitaciones y consideraciones de seguridad

Las pruebas realizadas corresponden a una primera fase de desarrollo enfocada en la validación del firmware y la transmisión de datos a través de un único nodo. No se incluyó

aún la evaluación cuantitativa del consumo energético ni la implementación de una red de múltiples nodos, aspectos considerados como trabajo futuro. En materia de seguridad, el nodo utiliza el método de activación OTAA (Over-The-Air Activation) de LoRaWAN, con cifrado AES-128 integrado en la capa de red, lo que garantiza la confidencialidad y autenticidad de los datos transmitidos.

No obstante, no se abordaron mecanismos adicionales de autenticación de usuario o gestión avanzada de claves, los cuales se contemplan en fases posteriores del proyecto junto con la incorporación de análisis de datos en la nube y visualización en dashboards.

8. Diseño del sistema embebido para el Nodo

El sistema embebido fue diseñado en Altium e integra el módulo LoRa-E5 como núcleo de procesamiento y comunicación, incorporando dos entradas para sensores: uno de humedad tipo capacitivo con salida analógica y otro de temperatura tipo sonda DS18B20 con protocolo digital One-Wire. Uno de los aspectos más destacables del diseño es la inclusión de un sistema dual de carga para batería de litio, basado en los controladores TP4056 junto con el circuito de protección DW01A y MOSFETs duales FS8205A, lo cual asegura una carga segura y eficiente, evitando sobrecargas o descargas profundas que puedan comprometer la vida útil de la batería.

Asimismo, se ha integrado un regulador step-down tipo buck TPS62172, el cual reduce el voltaje de entrada para suministrar de forma eficiente los 3.3 V requeridos por el sistema, optimizando el consumo energético. Además, el uso de transistores tipo MOSFET (SSM3K337R) en la alimentación de los sensores permite controlar el encendido y apagado de estos de forma programada desde el firmware, lo que representa una estrategia clave para reducir el consumo cuando no se están realizando mediciones. Finalmente, el sistema cuenta con una interfaz de programación (SWD), un interruptor general, headers dedicados para sensores y un indicador LED de estado, consolidando una arquitectura funcional, compacta y eficiente para nodos LoRaWAN de bajo consumo. La arquitectura anteriormente descrita se puede observar en la figura 10.

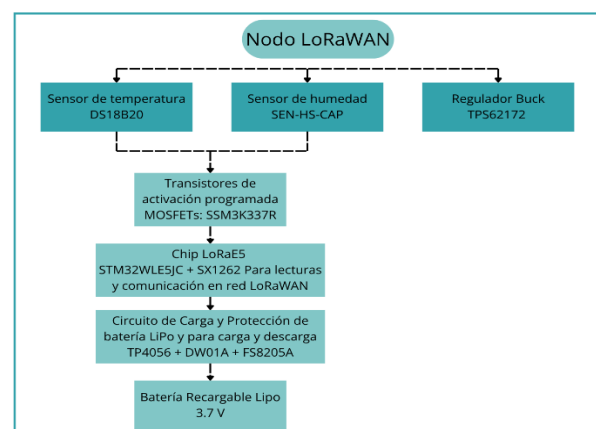


Figura 10: Arquitectura del sistema embebido del nodo de transmisión LoRaWAN propuesto

El diseño del sistema embebido dentro del software Altium se puede visualizar con un modelo 3D en la figura 11.



Figura 11: Modelo 3D del nodo propuesto como previsualización en el software Altium.

9. Estimaciones de consumo energético

Como parte de la estimación de consumo energético se consideran los valores genéricos proporcionados por los fabricantes en las hojas de especificaciones de cada dispositivo usado en el nodo en los diferentes modos de uso como se especifica en la tabla 2, en donde se considera una activación de entre 1 y 2 segundos acorde al dispositivo considerando que cada muestra o lectura y envío de datos ocurra cada 2 horas. En la tabla 3 se pueden observar los valores de manera más detallada.

Tabla 3: Estimaciones de consumo energético					
Modo de operación	Componente activo	Corriente típica	Duración estimada	Fuente referencia	Comentario
Transmisión LoRa	SX1262 MCU activo	+ 42 mA (a 14 dBm TX)	2 s	SX1262 datasheet	Radio TX + CPU activa
Recepción LoRa	SX1262 MCU activo	+ 10.8 mA	2 s	SX1262 datasheet	Radio en RX
Procesamiento / sensado	MCU activo + DS18B20 + SEN-HS-CAP	6.5 mA	1 s	STM32WLE5JC + DS18B20 datasheet	Lectura ADC + 1-Wire
Modo Sleep	MCU periféricos apagados	+ 2 µA	7150 s (≈ 2 h de intervalo)	STM32WLE5JC datasheet	MOSFETs desconectan sensores

10. Resultados obtenidos

Tras la integración de los sensores y la optimización del firmware personalizado en lenguaje C, se realizaron pruebas de campo para evaluar el alcance real del sistema propuesto. Estas pruebas se llevaron a cabo utilizando el gateway UG65 de Mulesight, instalado en la parte superior del edificio 5 de la Unidad Profesional Interdisciplinaria de Ingeniería Campus Hidalgo (UPIIH), en San Agustín Tlaxiaca, Hidalgo. Para la validación, se diseñó un recorrido de prueba que abarcó desde el boulevard del Minero, en Pachuca de Soto, hasta la UPIIH, con el objetivo de identificar el punto más lejano desde el cual el nodo era capaz de transmitir datos exitosamente a través de la red LoRaWAN y recibir confirmación en The Things Network (TTN). A lo largo del trayecto, se recorrieron zonas

mixtas (aproximadamente 50 % urbanas y 50 % en campo semi abierto) y se observó que la comunicación se establecía sin interferencias a partir de la carretera Pachuca–Actopan, frente al Instituto de Ciencias Sociales y Humanidades. En las figuras 14 y 15 se observa la fotografía satelital obtenida a través del Google earth de la distancia entre los puntos de envío y recepción como verificación del alcance.

En las pruebas de campo realizadas, el nodo alcanzó una distancia máxima de 5.3 km, lo que representa un valor consistente con las condiciones semirurales del entorno de prueba y con las pérdidas esperadas respecto al alcance teórico de 10 km reportado por el fabricante para condiciones ideales de campo abierto. Además, en este rango, el sistema mantuvo la transmisión completa de paquetes con retardos mínimos de entre 3 y 5 segundos. Los retardos de 3 a 5 segundos registrados durante la transmisión son coherentes con el comportamiento de dispositivos LoRaWAN clase A y resultan adecuados para el monitoreo agrícola, donde las variaciones de las variables ambientales no requieren tiempos de respuesta en tiempo real. Este desempeño confirma la viabilidad del sistema para aplicaciones de sensado remoto de baja frecuencia y largo alcance.

Este desempeño supera significativamente los resultados reportados en otros trabajos similares. En comparación con el sistema desarrollado por (Supanirattisai, U-Yen, Pimpin, Srituravanich, & Damrongplasit, 2022), que implementa una arquitectura incorpora sensores de bajo consumo energético y actuadores que regulan sistemas de riego y nebulización, con transmisión de datos en tiempo real hacia un servidor en la nube. Sin embargo, el alcance efectivo de comunicación reportado osciló entre 300 m y 1700 m, dependiendo de la calidad de la antena LoRa utilizada. Si bien su sistema implementa mecanismos de ahorro energético mediante modos de suspensión, la estructura se basa en nodos y actuadores separados, gestionados por comandos del servidor.

En contraste, la arquitectura desarrollada en este trabajo propone una integración completa en un único nodo embebido que concentra las funciones de sensado, procesamiento y comunicación, eliminando la necesidad de microcontroladores intermedios. Esta diferencia estructural elimina la necesidad de microcontroladores intermedios y firmwares genéricos, permitiendo un diseño más compacto, flexible y energéticamente eficiente. Además, el nodo desarrollado logró un alcance de hasta 5.3 km, superando el rango máximo de 1.7 km reportado en dicho estudio, lo que valida su desempeño en entornos agrícolas de mayor extensión. El alcance obtenido en pruebas se observa en las figuras 12 y 13.

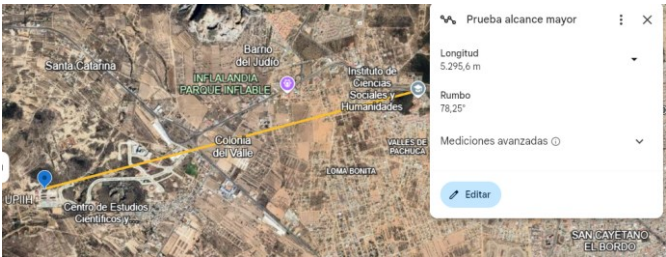


Figura 12: Trayecto entre el edificio 5 de la UPIIH y la carretera con mayor alcance obtenido bajo 5 segundos de retardo

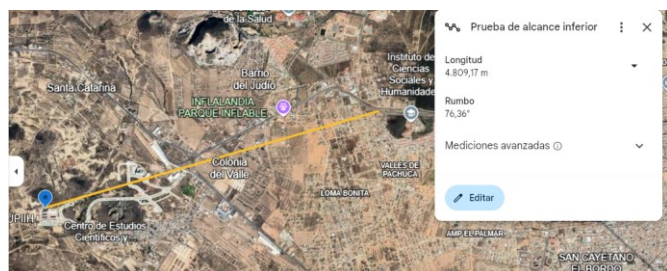


Figura 13: Trayecto entre el edificio 5 de la UPIIH y la carretera con un alcance menor, pero con menor retardo (3 segundos).

11. Conclusiones

Este trabajo presentó el diseño e implementación de un nodo de monitoreo ambiental para agricultura inteligente basado en tecnología LoRaWAN, destacando como principal aportación el desarrollo de una arquitectura embebida abierta, compacta y totalmente personalizable.

La integración del firmware LoRaWAN en lenguaje C directamente sobre el microcontrolador STM32WLE5JC del módulo LoRa-E5 permite eliminar dependencias de firmware propietario y prescindir de microcontroladores puente, lo que representa un avance frente a las plataformas comerciales tradicionales., ofreciendo una solución compacta, extensible y de bajo consumo energético.

A diferencia de soluciones cerradas que limitan la incorporación de sensores mediante comandos AT, el sistema propuesto ofrece al desarrollador control total sobre la gestión de periféricos, ampliando la capacidad de monitoreo sin comprometer la eficiencia energética. El diseño incluye una lógica de bajo consumo basada en el encendido controlado de sensores

Las pruebas de campo confirmaron un alcance de transmisión confiable de hasta 5.3 km, validando su desempeño en escenarios rurales. En conjunto, estos resultados consolidan la originalidad del enfoque propuesto al combinar bajo consumo, flexibilidad y control total del firmware en un solo nodo embebido, posicionándolo como una alternativa de desarrollo abierta y adaptable para la agricultura inteligente.

Estos resultados posicionan al sistema como una alternativa viable y adaptable para aplicaciones de monitoreo ambiental en zonas rurales y agrícolas. Además, sientan las bases para futuras mejoras, como la inclusión de nuevos sensores, algoritmos de toma de decisiones locales y mecanismos de actualización remota del firmware, consolidando su potencial dentro del ecosistema de agricultura de precisión.

12. Trabajo a futuro

Si bien el presente trabajo se centró en la implementación del nodo embebido como elemento principal de la plataforma IoT,

las siguientes etapas de desarrollo contemplan la expansión hacia un ecosistema completo de monitoreo agrícola inteligente. Aunque actualmente es posible la visualización de datos como The Things Network (TTN), esta próxima fase incluirá la integración del nodo con plataformas de gestión complementadas con herramientas de análisis y dashboards basados en Node-RED, Grafana o plataformas móviles personalizadas.

Asimismo, se proyecta el despliegue de una red de múltiples nodos distribuidos dentro del área de cobertura del gateway, con el objetivo de realizar un procesamiento conjunto de la información en la nube. Esta expansión permitirá realizar análisis de tendencias de humedad y temperatura en distintas zonas de cultivo, facilitando la toma de decisiones agronómicas basadas en datos. De esta manera, la plataforma evolucionará de un nodo individual hacia un sistema integral de agricultura inteligente orientado a la eficiencia energética, la escalabilidad y la autonomía operativa.

13. Referencias

- Arezki, R. (17 de Enero de 2017). *Helping Feed the World's Fast-Growing Population*. Obtenido de IMF: <https://www.imf.org/en/Blogs/Articles/2017/01/31/helping-feed-the-worlds-fast-growing-population#:~:text=Food%2Dcalorie%20production%20will%20have,spill%20over>
- ISO. (2024). *Smart farming: the transformative potential of data-driven agriculture*. Obtenido de ISO: <https://www.iso.org/smart-farming/smart-farming-datadriven>
- Jackulin, C. M. (2025). AI-Driven IoT-Enabled Precision Agriculture: Optimizing Resource Usage with LoRaWAN and Drone-Based Monitoring. *International Conference on Data Science, Agents & Artificial Intelligence (ICDSAAI)*, (págs. 1-5). Chennai, India. doi:10.1109/ICDSAAI65575.2025.11011723
- López Díaz, N. L. (2021). Principales análisis para la toma de decisiones en las producciones agropecuarias. *Revista Universidad y Sociedad*, 13(3), 233-242. Obtenido de http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2218-36202021000300233&lng=es&tling=es
- M. Centenaro, L. V. (2016). Long-range communications in unlicensed bands: the rising stars in the IoT and smart city scenarios. *IEEE Wireless Communications*, 23(5), 60-67. doi:10.1109/MWC.2016.7721743
- P. Maurya, T. B. (2024). The Impact of LoRaWAN Relay Mode on IoT End Node Energy Consumption. *IEEE International Workshop on Metrology for Agriculture and Forestry (MetroAgriFor)*, 683-688. doi:10.1109/MetroAgriFor63043.2024.10948746
- Sjaak Wolfert, L. G.-J. (2017). Big Data in Smart Farming – A review. *Agricultural Systems*, 153, 69-80. doi:<https://doi.org/10.1016/j.agsy.2017.01.023>
- Supanirattisai, P., U-Yen, K., Pimpin, A., Srituravanich, W., & Damrongplasit, N. (2022). Smart Agriculture Monitoring and Management System using IoT-enabled Devices based on LoRaWAN. *37th International Technical Conference on Circuits/Systems, Computers and Communications (ITC-CSCC)*, (págs. 679-682). Phuket, Thailand. doi:10.1109/ITC-CSCC55581.2022.9894956
- Suwaid, M. M. (2019). Embedded LoRaWAN for Agricultural Sensing Applications. *019 IEEE 6th International Conference on Engineering Technologies and Applied Sciences (ICETAS)*, (págs. 1-5). Kuala Lumpur, Malaysia. doi:10.1109/ICETAS48360.2019.9117346