

Transformación agrícola: implementación de un sistema de Monitoreo IoT para la gestión inteligente de cultivos

Agriculture transformation: appliance of an IoT monitoring system for smart harvest management

José A. Quiroz-Valdez ^a, Jose A. Almaraz-Damian ^b, Eduardo Ramos-Diaz ^{a,*}

^aUniversidad Autónoma de la Ciudad de México, Colegio de Ciencia y Tecnología, ISET, Prolongación San Isidro 151, Col. San Lorenzo Tezonco, Iztapalapa, 09790, Ciudad de México, México.

^bCentro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, Unidad de Transferencia Tecnológica Tepic (CICESE-UT³), Tepic, 63173, Nayarit, México.

Resumen

El avance de las tecnologías contemporáneas está revolucionando diversos sectores, y la agricultura no es una excepción. La internet de las cosas (IoT) ha emergido como una herramienta poderosa para optimizar el uso de los recursos y mejorar la productividad en la agricultura. Este estudio presenta el desarrollo de un sistema de monitoreo agrícola que emplea el microcontrolador ESP32, integrado con una variedad de sensores. Los datos recopilados son transmitidos mediante un módulo *LoRa*®, lo que permite la monitorización remota y en tiempo real de las condiciones del cultivo. Estos datos se almacenan en una base de datos y se visualizan en una página web, proporcionando una visión del estado de los cultivos, incluyendo niveles de riego y posibles afectaciones.

Palabras Clave: agricultura, *IoT*, datos, sistema, monitoreo.

Abstract

The advancement of modern technologies is revolutionizing various sectors, and agriculture is no exception. The Internet of Things (*IoT*) has emerged as a powerful tool to optimize resource use and improve productivity in agriculture. This study presents the development of an agricultural monitoring system that employs the ESP32 microcontroller integrated with various sensors. The collected data is transmitted through a *LoRa* ®module. Providing remote and monitoring of harvest conditions. This data is stored in a database and displayed on a webpage, providing a near real-time view of the status of the crops, including irrigation levels and their possible effects.

Keywords: harvest, *IoT*, data, system, monitor.

1. Introducción

La agricultura, siendo uno de los pilares fundamentales de la civilización humana, enfrenta hoy desafíos cruciales que van más allá de la simple producción de alimentos. En medio de la creciente demanda global por productos agrícolas, surge una preocupación cada vez más urgente: los impactos ambientales derivados de las prácticas agrícolas modernas.

El aumento en la producción agrícola ha tenido consecuencias negativas en los recursos naturales, tales como la escasez y

la contaminación del agua, además de la contaminación del suelo, el cambio climático y la pérdida de biodiversidad. Abastecer la demanda de alimentos a nivel nacional se ha convertido en un desafío perentorio. La agricultura moderna enfrenta constantes retos, desde la optimización de recursos, hasta la mitigación de riesgos ambientales FAO (2024a); OMS (2021).

En este contexto, la adopción de tecnologías disruptivas como el Internet de las cosas (*IoT*) ofrece nuevas oportunidades para mejorar la eficiencia y la productividad en el campo. La creación de un sistema de monitoreo agrícola *IoT* que, median-

*Autor para correspondencia: eduardo.ramos@uacm.edu.mx

Correo electrónico: eduardo.ramos@uacm.edu.mx (Eduardo Ramos-Diaz), jose.quiroz@estudiante.uacm.edu.mx (Jose Angel Quiroz-Valdez), almaraz@cicese.mx (Jose Agustín Almaraz-Damian)

Historial del manuscrito: recibido el 02/07/2024, última versión-revisada recibida el 02/10/2024, aceptado el 02/10/2024, publicado el 30/11/2024. **DOI:** <https://doi.org/10.29057/icbi.v12iEspecial4.13323>



te la recopilación y análisis de datos de forma rápida y eficiente, busca revolucionar la forma en que se gestionan los insumos por parte del agricultor y por ende los cultivos. Este enfoque innovador podría representar un paso fundamental hacia una agricultura más sostenible y respetuosa con el medio ambiente, debido a que los procesos que hemos llevado a cabo por miles de años ahora experimenten un cambio en la eficiencia a partir del análisis de datos que estos sistemas permiten realizar.

Los dispositivos que operan en la *IoT* comúnmente adquieren información y hacen el envío de ella por medio de diferentes protocolos de comunicación y entregan al usuario final reportes, con el fin de generar servicios significativos, como el monitoreo ambiental, sistemas de vigilancia o la agricultura inteligente.

Estos dispositivos han ganado interés en la última década tanto en el ámbito industrial como el de investigación, ya que pueden diseñar, desarrollar e implementar sistemas que cuenten con diversos tipos de sensores, actuadores y sistemas de procesamiento que sean capaces de realizar una tarea específica. Una característica primordial es la transmisión de los datos adquiridos a un *Gateway* con la finalidad de un posterior procesamiento. Dicho procesamiento actualmente puede ser realizado por sistemas de inteligencia artificial con la finalidad de que a partir de un evento el sistema inteligente pueda realizar una tarea (FAO (2024b)).

Gordillo y A. (2021), describe un sistema de monitoreo en invernaderos basado en redes *LPWAN* (Low Powered Wireless Area Network) y un *Meta* Sistema Operativo, empleando algoritmos de Aprendizaje de Máquina para analizar variables ambientales como la radiación UV, emisiones CO_2 , temperatura y humedad, mejorando la precisión al tomar la decisión de realizar el riego y otras prácticas agrícolas mediante datos procesados tecnológicamente.

El proyecto presenta diversas consideraciones importantes a tener en cuenta. Primeramente, el módulo de transmisión RFM95, que opera en frecuencias libres como las bandas *ISM*, puede ser susceptible a interferencias de otros dispositivos, lo cual afecta la fiabilidad de las comunicaciones.

Por otro lado, el sensor de CO_2 , SCD30 requiere de un proceso de calibración periódica para mantener su exactitud, lo cual puede resultar costoso dependiendo del entorno y los estándares de calidad requeridos, el costo del sensor es elevado. El sensor UV, ML8511, también requiere de una calibración periódica debido a la influencia de las condiciones ambientales, afectando en la precisión de las mediciones debido a la susceptibilidad a interferencias ambientales, afectando la exactitud de los datos obtenidos.

Finalmente, la Raspberry Pi Zero, tiene limitaciones de *Hardware* (HW), ya que cuenta con un procesador de un núcleo y 512MB en RAM y debido a que emplea un Sistema Operativo, ocupa dichos recursos en diversas tareas.

Serna et al. (2012) diseña un sistema que no requiere comunicaciones inalámbricas de ninguna índole, implicando que los datos son adquiridos manualmente por interfaces de usuario

o de forma automática mediante *scripts* o aplicaciones dedicadas. Además, los sensores empleados están conectados a la unidad de procesamiento seleccionando la plataforma de Arduino® para su envío al servidor.

El enfoque presente tiene algunos inconvenientes significativos, como la dependencia de la proximidad física, debido a la limitante de transmisión por cable de los sensores y su ubicación. El requerimiento de ingreso manual de algunos datos que puede incurrir a errores por parte del encargado y las actualizaciones frecuentes.

Los sensores empleados son el DS18B20 y el sensor FC-28, el primero es un sensor de temperatura digital el cual tiene como problemática su tiempo de respuesta debido al algoritmo empleado en la comunicación *1-Wire*®, en él que requiere que, el envío de datos se solicite a la memoria *EEPROM* interna del termómetro y este haga una codificación *CRC* para validar que los datos son enviados correctamente. El segundo sensor, adquiere datos de humedad en el suelo, la problemática que se tiene con estos sensores es que dependiendo el tipo de suelo y las condiciones ambientales locales requiere de una calibración específica.

J. y Mañay Quinatoa (2023), propone un sistema de monitoreo del pH del suelo y del agua en invernaderos, empleando sensores de pH y un sistema *SCADA* para la visualización y monitoreo automático con la finalidad de mejorar el rendimiento de los cultivos y reduciendo pérdidas económicas, beneficiando a agricultores, ya que proporciona una herramienta eficiente para el manejo agrícola.

Al emplear un sistema *SCADA* hace que aumente tanto los costos como la complejidad operativa en comparación con las soluciones modernas basadas en *IoT*, limitando su capacidad para proporcionar monitoreo y optimización de recursos naturales, aspectos esenciales en la agricultura moderna.

Como se puede observar de los trabajos expuestos en el *Estado-del-Arte*, algunos carecen de capacidades de adquisición efectivas, debido a que se requiere una constante calibración de los sensores acuerdo al tipo de terreno en el que se esté implementando. Además, algunos carecen de aspectos importantes como el empleo de comunicaciones inalámbricas o el empleo de sistemas de procesamiento que no solo se dedican a una tarea, sino que dependen de Sistemas Operativos, los cuales realizan procesos secundarios para la adquisición de los datos. Por ello consideramos la importancia de desarrollar un sistema que sea capaz de poder mitigar los problemas descritos anteriormente, garantizando la correcta adquisición de datos y el envío de estos para su posterior procesamiento.

El presente trabajo trata de mejorar y complementar las propuestas anteriores, las contribuciones principales son:

- Transmisión de datos en cercano al tiempo real y almacenamiento en un servidor, ofreciendo una solución más completa y escalable.
- Simplicidad en la estructura de transmisión y almacena-

miento, facilitando la implementación y el uso en diferentes escenarios.

- Proporcionar datos casi instantáneos y continuos, mejorando la toma de decisiones informadas sobre el manejo de cultivos.
- Ofrece un monitoreo integral de múltiples parámetros y una interfaz web para una visualización más accesible y manejable.
- Cobertura y Eficiencia Energética.
- Almacenamiento y Procesamiento Eficiente.

2. Metodología

Para afrontar los desafíos ambientales en la agricultura contemporánea y establecer un sistema de monitoreo agrícola basado en el *IoT* que nos permita determinar si un cultivo está en condiciones óptimas, es crucial comprender los distintos problemas que pueden surgir durante su desarrollo. Este análisis nos capacita para diseñar, desarrollar e implementar un prototipo capaz de gestionar y controlar eficientemente cada una de estas problemáticas. La implementación del Sistema de Gestión Agrícola con Control Inteligente (*SIGACT*) véase Fig.1, se llevó a cabo en diversas etapas, las cuales se describirán a continuación.

2.1. Transmisor

De acuerdo a la Fig. 1, para el nodo transmisor, se requiere primeramente el diseño e implementación de los sensores. Para el sensor de humedad se seleccionó el SEN-HS-CAP debido a que por el método capacitivo el cual implementa, este mide los cambios en la capacitancia causados por el contenido de agua en el suelo teniendo una mejor precisión y proporcionando lecturas más consistentes en sueldos con diferentes niveles de salinidad. Además, es menos susceptible a la variedad de lecturas debido a la corrosión en comparación a otros sensores de humedad como el FC-28.

El SEN-HS-CAP funciona según el principio de la capacitancia. Emplea electrodos o placas capacitivas que interactúan con el medio circundante (suelo, en este caso) para determinar la humedad. Las placas capacitivas del sensor interactúan con la humedad del suelo. La cantidad de agua presente en el suelo afecta la capacitancia del sensor. La humedad del suelo altera la constante dieléctrica del medio entre las placas, lo que a su vez modifica la capacitancia del sensor.

A medida que la humedad del suelo incrementa, la capacitancia del sensor también, debido a la mayor constante dieléctrica del agua en comparación con el suelo seco. Esta variación en la capacitancia se correlaciona directamente con el contenido de humedad del suelo.

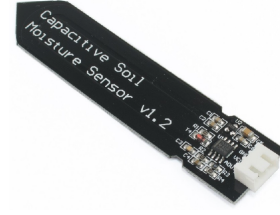


Figura 2: Sensor de Humedad SEN-HS-CAP (GmbH. (2021)).

Para el segundo sensor se diseñó un circuito para medir los niveles de cambio de luz (véase Fig. 3). Primeramente, se tiene un circuito divisor de corriente el cual está conectado a un circuito anti-rebote *debouncing*, la finalidad es de suavizar alguna señal que rebote debido al retraso que se genera en algún cambio de la señal adquirida, comúnmente se utiliza un filtro RC de primera etapa y empleando un amplificador operacional (*Op-Amp*) LM741 configurado como un filtro *pasa-bajas* de 3er orden (*Sallen-Key*). Este filtro permite frecuencias menores a 100Hz, reduciendo las transiciones de altas frecuencias como lo son luces de tipo *estrobo* o cambios abruptos por otro tipo de generador de luz. Para generar este filtro es necesario calcular los valores de Q y ω_0 que están dados por:

$$\omega_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{R_1R_2C_1C_2}} \quad (1)$$

$$Q = \frac{\sqrt{R_1R_2C_1C_2}}{C2(R_1 + R_2)} \quad (2)$$

donde, $R_{1,2}$ son los valores de las resistencias y $C_{1,2}$ son los valores de los capacitores respectivamente, ω_0 es el valor de la frecuencia de corte establecida y Q es el factor que determina la altura y el ancho del punto más alto de la respuesta en frecuencia del filtro.

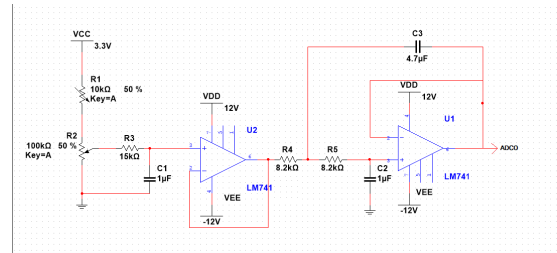


Figura 3: Circuito acondicionador para la adquisición de Luminosidad.

El circuito promediador inversor es un tipo configuración de Amplificadores Operacionales empleados para medir y generar señales invertidas o con polaridades opuestas respecto a la señal de entrada. El circuito promediador inversor utiliza un amplificador operacional (*Op-Amp*) configurado en una configuración inversora.

En esta configuración, se utilizó el LM741. Las señales de entrada se aplican a través de una resistencia (R_n) de entrada al terminal inversor (entrada negativa) del *Op-Amp*. La salida del *Op-Amp* se toma de su terminal de salida Electrónica (2012).

$$V_{out} = \frac{V_1 + V_2 + V_3 + \dots + V_n}{n}, \quad (3)$$

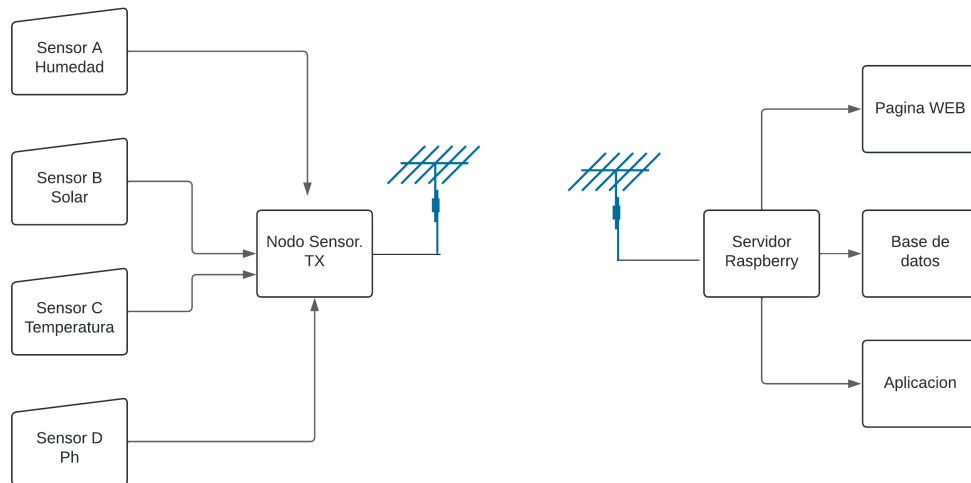


Figura 1: Diagrama a bloques del sistema SIGACI.

donde, V_{out} es el voltaje de salida, V_1, V_2, V_3, V_n , son los voltajes de entrada, y además se debe calcular el valor de R_f , el cual está dado por:

$$R_f = \frac{R_i}{n}, \quad (4)$$

donde, R_i son las resistencias de entrada que deben cumplir con: $R_i = R_1 = R_2 = R_3 = R_n$ y $R_n > R_f$.

Para la medición de la temperatura, se optó por usar el *LM35*, ya que ofrece una precisión superior en comparación de otros sensores, al ser un sensor lineal, la lectura y el procesamiento de los datos es de forma eficiente en comparación de sensores digitales, además de tener un consumo de energía extremadamente bajo. Algunas características que se pueden mencionar son:

- **Salida Lineal:** La salida es de 10 mV por grado Celsius. Por ejemplo, a 25°C, el LM35 produce una salida de 250 mV.
- **Precisión:** Generalmente, tiene una precisión de $\pm 0.5^\circ\text{C}$ a temperatura ambiente.
- **Rango de Temperatura:** Puede medir temperaturas en un rango de -55°C a $+150^\circ\text{C}$.
- **Calibración:** El LM35 está calibrado directamente en grados Celsius, lo que simplifica su uso en aplicaciones que requieren mediciones de temperatura en esta escala.

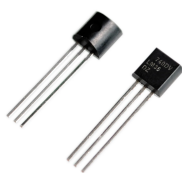


Figura 4: Sensor de temperatura LM35 (Instruments (2000)).

Para medir pH, se decidió usar el PH-4502C debido a su precisión y facilidad de integración. Este sensor puede conectarse directamente a los pines analógicos de la unidad de procesamiento, lo que simplifica significativamente el proceso de integración, reduciendo la complejidad del sistema.

El sensor pH-4502C es un tipo de electrodo utilizado para medir el nivel de acidez o alcalinidad de una solución. Si bien existen diversos métodos para medir el pH este sensor permite obtener una lectura con precisión y fiabilidad en la medición del pH de soluciones líquidas. Opera fundamentalmente gracias a un electrodo de vidrio especializado, que reacciona con los iones de hidrógeno H^+ en la solución, internamente este sensor contiene una solución de cloruro de potasio KCL, la cual al entrar en contacto con otra solución genera una diferencia de potencial, esta es obtenida por medio de un amplificador operacional el cual amplifica dicha diferencia y entrega un voltaje de salida. Cabe mencionar que el sensor también tiene etapas de filtrado de bajo ruido y un circuito para su calibración.

En pocas palabras el sensor pH-4502C convierte una señal de muy bajo voltaje generado por el electrodo de pH en una señal analógica utilizable mediante un circuito que incluye amplificación, filtrado, y ajustes de calibración. Este diseño permite medir de manera precisa el pH de una solución.



Figura 5: Sensor de pH pH-4502C (Qiangwei (2015)).

En pocas palabras el sensor pH-4502C convierte una señal de muy bajo voltaje generado por el electrodo de pH en una señal analógica utilizable mediante un circuito que incluye amplificación, filtrado, y ajustes de calibración. Este diseño permite medir de manera precisa el pH de una solución, a continuación se muestra la etapa de filtrado en la adquisición del sensor pH-4502C, el cual es el propuesto por el fabricante (Qiangwei (2015)).

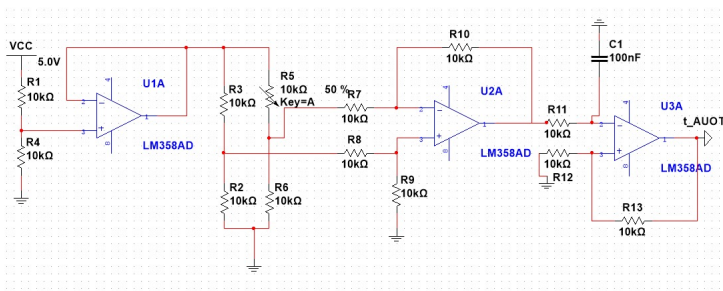


Figura 6: Esquemático propuesto por (Qiangwei (2015)).

En la parte de procesamiento al ver una gran cantidad de dispositivos disponibles se optó por utilizar la placa *ESP32-WROOM*, estas placas son diseñadas especialmente para aplicaciones de *IoT* y tecnología *wearable*. Este *SoC* (System on a Chip) tiene como principales características:

- Wi-Fi y Bluetooth
- UART, SPI, I^2C , I^2S , ETH
- ADC, DAC
- Timers
- CPU Xtensa Dual-core @ 240MHz

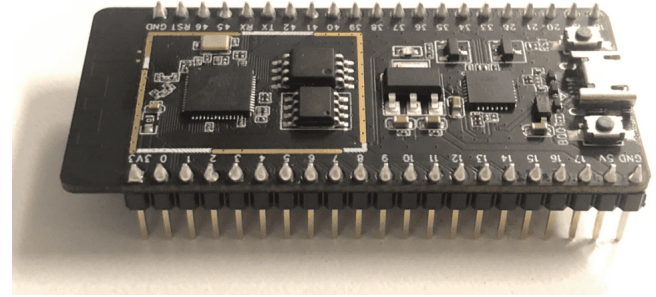


Figura 7: Unidad de Procesamiento ESP-32 (Odunlade (2020)).

Para la parte de comunicación, se emplea el módulo *LoRa* E220, el cual permite ser programado por medio del protocolo *UART* (Universal Asynchronous Receiver-Transmitter) debido a que emplea el IC *LLCC68*, teniendo la flexibilidad de ser implementado en cualquier unidad de procesamiento, además de su bajo costo.



Figura 8: Módulo de comunicación E220 (Ebyte (2020)).

2.2. Transmisión de Datos

La transmisión de datos a través de módulos de radio es una práctica común en diversas aplicaciones tecnológicas, desde el *IoT* hasta sistemas de comunicación industrial. La selección y configuración adecuadas de estos módulos son esenciales para garantizar una comunicación efectiva y confiable. Cada módulo de radio opera en una frecuencia específica, que debe seleccionarse de acuerdo con las necesidades de la aplicación y las regulaciones locales. Por ejemplo, de acuerdo con Santiago y C. (2021), los módulos *Bluetooth* operan típicamente en la banda de 2.4 GHz, mientras que los módulos RF pueden utilizar bandas como 433 MHz o 915 MHz Moreno *et al.* (2019).

2.2.1. LoRa

Como se mencionó, el sistema *SIGACI* emplea la tecnología *LoRa* la cual utiliza una modulación de espectro ensanchado (CSS) para transmitir datos a través del aire. Los datos se transmiten en forma de paquetes, utilizando una de las varias

técnicas de modulación disponibles en *LoRa*, como *LoRa Modulation* o *FSK* (Frequency Shift Keying) Rodríguez y Suero (1995). La señal del módulo *LoRa* e220 puede alcanzar distancias de 5 Km en entornos rurales, con una potencia de 22 dBm, según las condiciones del terreno y otros factores ambientales Ebyte (2020).

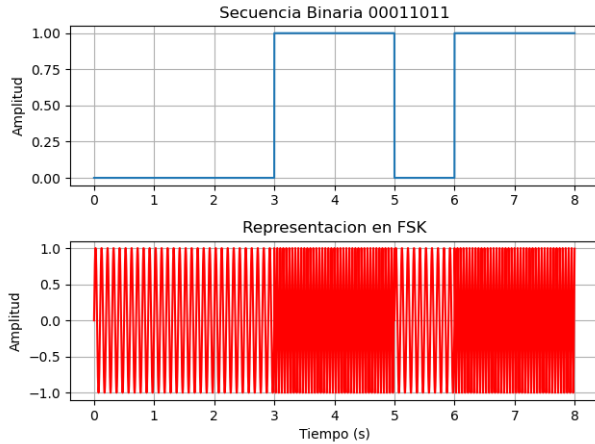


Figura 9: Diagrama de la modulación FSK a partir de una secuencia binaria.

En la Fig.9 se observa una modulación 4-FSK, lo que significa que es un FSK con cuatro símbolos diferentes ('00', '01', '10' y '11'), permitiendo la transmisión de dos bits por símbolo Project (2019).

Cuando se pierde la comunicación entre el transmisor (TX) y el receptor (RX), el sistema implementa un protocolo basado en la verificación del estado del módulo y el manejo de tiempos de espera. El comportamiento del sistema en esta situación está diseñado en torno a dos mecanismos principales, este protocolo se basa en la tecnología *LoRa Spread Spectrum Modulation*, en la cual se realiza una *verificación del estado de ocupación del módulo* mediante el cambio de estado del Pin AUX.

Este proceso permite al sistema determinar si el transmisor está ocupado o si hay algún retraso en la comunicación al enviar un paquete de verificación. Si el Pin AUX está en estado bajo, lo que indica que el módulo está ocupado, el sistema entra en un ciclo de espera durante este tiempo, se permite al módulo completar cualquier tarea pendiente antes de reintentar la comunicación.

En segundo lugar, si tras esos 5 segundos el transmisor continúa ocupado, el sistema no realiza acciones adicionales en el ciclo actual. Simplemente, se suspende la transmisión de datos, cabe destacar que el sistema no tiene un mecanismo explícito para manejar una pérdida total de comunicación, en lugar de eso, cada ciclo evalúa si el transmisor sigue ocupado, permitiendo que se retomen los intentos de comunicación en cada iteración del bucle.

El sistema está diseñado para manejar la ocupación del módulo mediante un ciclo de espera, permitiendo que este complete sus tareas pendientes. Si la comunicación no se restablece después de un periodo de 5 segundos, el sistema sigue

intentando la transmisión en los siguientes ciclos del bucle sin detenerse por completo. Sin embargo, no aborda explícitamente la pérdida permanente de comunicación.

Aunado a estas características, la tecnología *LoRa*, emplea CRC-16, que es un CRC (Cyclic Redundancy Check) de 16 bits. Este CRC se calcula y se adjunta al final del paquete de datos antes de la transmisión. Cuando el paquete es recibido, el receptor calcula nuevamente el CRC y lo compara con el CRC recibido para verificar si el paquete fue transmitido sin errores. El polinomio generador de CRC-16 está dado por:

$$x^{16} + x^{12} + x^5 + 1. \quad (5)$$

El uso del *CRC* es opcional en *LoRa*, y la configuración específica puede variar según el fabricante del módulo *LoRa* y la implementación del protocolo.

2.2.2. UART

El sistema *SIGACI*, al contener la unidad de procesamiento ESP-32 es compatible con el módulo E220 debido a que al tener implementado el protocolo UART (Universal Asynchronous Receiver-Transmitter) Rohde y Schwarz (2024); Devices (2024) permite la comunicación del módulo y la unidad de procesamiento en forma de bits. En la UART, los datos se envían en paquetes de bits que incluyen:

- Bit de Inicio (Start Bit): Indica el comienzo de una transmisión de datos. Es siempre un bit de valor bajo (0).
- Bits de Datos (Data Bits): La información que se está enviando. Puede ser de 5 a 9 bits de longitud.
- Bit de Paridad (Parity Bit): Opcional. Se utiliza para la detección de errores. Puede ser par, impar, o no utilizado (sin paridad).
- Bits de Parada (Stop Bits): Indican el final de la transmisión de datos. Pueden ser uno o dos bits de valor alto (1).

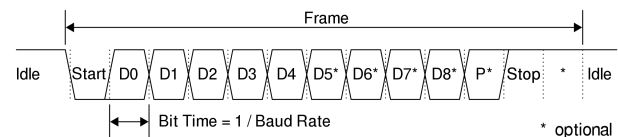


Figura 10: Datagrama del protocolo UART (Etheridge (2023)).

2.3. Receptor y Sistema de Procesamiento

Como receptor se emplea una Raspberry Pi 4B, la cual es un sistema embebido el cual contiene:

- CPU BCM2711 @ 1.5GHz
- Wi-Fi y Bluetooth
- UART, SPI, I²C, I²S, ETH
- ADC, DAC
- Timers
- 4, 8 o 16 GB en RAM

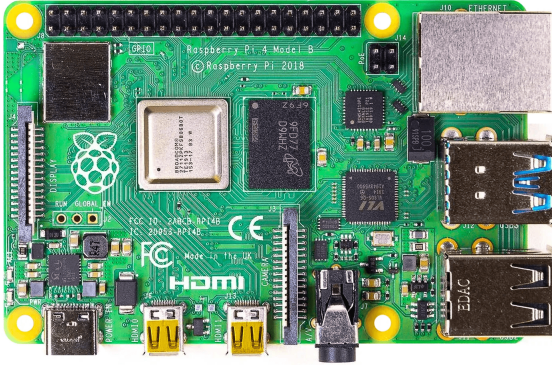


Figura 11: Tarjeta SBC Raspberry Pi 4B (Ltd (2020)).

Este sistema permite el uso de diversos Sistemas Operativos basados en el kernel de Linux, para este trabajo se empleó el distro Debian para arquitectura ARM64 y como receptor de comunicación *LoRa*, se utilizó un módulo E220.

3. Experimentación y Resultados

En la Fig.12, se puede apreciar el prototipo del sistema *SIGACI*, este se encuentra midiendo niveles de pH, temperatura, humedad y luminosidad de una planta. Además, se aprecia el envío de datos por medio del módulo E220 y de la unidad de procesamiento ESP32 el cual programó utilizando el lenguaje de programación C por medio del compilador GNU-GCC y la interfaz Arduino IDE.

3.1. Adquisición de datos

A partir de los sensores seleccionados, estos ingresan a los canales ADC que incluye la unidad de procesamiento ESP32, a continuación se describirá el proceso de lectura y construcción de la trama a enviar al receptor.

Para el sensor de luminosidad se obtiene la siguiente la lectura de la siguiente manera:

$$l = 100 \left(\frac{3.3V}{2^{10}} \right) (ADC_{Read}), \quad (6)$$

donde: 3.3V es el voltaje de referencia empleado, 2^{10} es la cantidad de bits que maneja el ADC, en este caso el ADC es de 10 bits y ADC_{Read} es la lectura que está adquiriendo el ADC en ese momento.

Adicionalmente, se hizo la caracterización del sensor donde, se envía el siguiente dato a partir de la siguiente regla de decisión:

$$l = \begin{cases} 0, & \text{if } 430 \geq h \geq 520 \\ 50, & \text{if } 430 \geq h \geq 350 \\ 100, & \text{if } 350 \geq h \geq 260 \end{cases} \quad (7)$$

Para el caso de la temperatura, es similar al anterior donde:

$$t = 100 \left(\frac{3.3V}{2^{10}} \right) (ADC_{Read}), \quad (8)$$

donde: 3.3V es el voltaje de referencia empleado, 2^{10} es la cantidad de bits que maneja el ADC, en este caso el ADC es de 10 bits y ADC_{Read} es la lectura que está adquiriendo el ADC en ese momento, también esta fórmula se repite para el caso del sensor de humedad.

Finalmente, para la adquisición del pH se realiza la siguiente operación:

$$pH = 7 + \frac{\left(\frac{ADC_{Read}}{2^{10}} \right) (V_{op} - V_n)}{V_{pH}} - K, \quad (9)$$

donde: la constante con valor de 7, es debido a que suponemos que la solución a analizar es neutra, es decir no es ni ácido ni base, 2^{10} es la cantidad de bits que maneja el ADC, en este caso el ADC es de 10 bits y ADC_{Read} es la lectura que está adquiriendo el ADC en ese momento, V_{op} , es el voltaje de operación, V_n es el voltaje natural, V_{pH} es el voltaje de pH y K es la calibración establecida.

Para asegurar que la adquisición de datos por parte del sistema *SIGACI* es confiable y consistente se tomaron 5000 muestras durante 12 Hrs., con la finalidad de realizar un análisis estadístico, el cual se muestra a continuación.

No obstante, una segunda prueba se obtuvieron 500 muestras, inyectando voltaje en cada una de las entradas de los sensores. Los voltajes empleados son 1.2V, 1.5V, 1.8V y 2.5V, respectivamente simulando una lectura de cada sensor, posteriormente se procedió a realizar el análisis estadístico el cual se muestra en la siguiente tabla.

Como se aprecia en la tabla 3.1, los valores adquiridos por el sistema *SIGACI*, tienen una varianza cercana a la media obtenida esto quiere decir que la variabilidad de las mediciones es pequeña y casi cercana a 0, esto se repite durante la adquisición de cada uno de los sensores con diversos voltajes inyectados, reforzando que el sistema obtiene mediciones de precisión.

3.2. Envío de Datos

Los datos se envían por medio de la UART (8N1) a una velocidad de 9600bps al módulo E220, que es el que se encarga de transmitirlos por medio de la comunicación *LoRa* la cual tiene una frecuencia de 433MHz. La transmisión *LoRa* permite enviar datos a largas distancias con consumo de energía de 158.49mW, lo que lo hace ideal para este proyecto de monitoreo de largo alcance.



Figura 12: Prototipo del sistema SIGACI.

Tabla 1: Estadística descriptiva de las mediciones con los sensores mencionados.

	Humedad	Lux	Temp °C	pH
\bar{x}	4.26975	142.45	22.9498	6.371
$\sigma^2(x)$	1.856	3780.122	22.170	0.9610
$\sigma(x)$	1.362	61.48	4.7075	0.98035

Tabla 2: Estadística descriptiva de las mediciones de valores propuestos 1.2V, 1.5V, 1.8V y 2.5V respectivamente.

	Humedad	Lux	Temp °C	pH
1	1.22	1.52	1.81	2.5
2	1.22	1.49	1.79	2.51
3	1.22	1.53	1.86	2.49
...
499	1.19	1.5	1.85	2.48
500	1.18	1.48	1.79	2.48
\bar{x}	1.2051	1.505	1.818	2.505
$\sigma^2(x)$	0.0004	0.0045	0.0000	0.0000
$\sigma(x)$	0.0212	0.2121	0.0007	0.0007

3.2.1. Rango de envío

Con la finalidad de estimar el alcance del sistema *SIGACI*, se procedió a hacer simulaciones de los modelos de Longley-Rice y Free Space con la finalidad de determinar la distancia máxima para poder recibir datos de forma eficiente.

El modelo Longley-Rice nos permite modelar el comportamiento de la radiación electromagnética desde un punto de transmisión a través de terrenos irregulares, incluyendo edificios, es conocido como el Modelo de Terreno Irregular (ITM). El modelo está diseñado para frecuencias de 20 MHz a 20 GHz, distancias de 1 a 2000 km y alturas de antena de 0,5 a 3000 m. Además, calcula la pérdida de trayectoria considerando la pérdida de espacio libre, la difracción por el terreno y los obstáculos, la reflexión en la tierra, la refracción atmosférica y la dispersión troposférica MathWorks (2024).

Proporciona estimaciones de pérdida de trayecto mediante la combinación de datos físicos y empíricos. Aunque el modelo es muy complejo y su implementación completa está fuera del alcance de una simple fórmula se puede calcular con la siguiente fórmula:

$$A = AFS + AA + AH + AM - A_c, \quad (10)$$

donde A es la atenuación total en dB, AFS es la atenuación por espacio libre (free-space loss), que depende de la distancia entre el transmisor y el receptor, AA es la atenuación adicional debido a la curvatura de la Tierra AH es la atenuación adicional debido a las pérdidas por obstáculos como edificios y árboles AM es la atenuación adicional debido a la dispersión multimodal de la señal y AC es la atenuación corregida, que tiene en cuenta la variabilidad estadística de la señal.

El modelo de propagación de espacio libre es uno de los modelos más simples y fundamentales en el estudio de la propagación de ondas de radio. Se basa en la suposición de que la señal se propaga en un entorno ideal sin obstáculos, donde la única pérdida de señal se debe a la dispersión de la energía de la onda electromagnética en el espacio.

$$FS PL_{(dB)} = 20 \log_{10}(d) + 20 \log(f) + 20 \log\left(\frac{4\pi}{c}\right), \quad (11)$$

En el entorno de simulación *MATLab Online* nos permite observar la variedad de factores que pueden afectar la propagación de las señales de radio como en una zona específica, como la frecuencia de la señal, la altitud de las antenas transmisoras y receptoras, la topografía del terreno, la conductividad eléctrica del suelo, las condiciones atmosféricas y otros parámetros relevantes. Para ello se emplea dicho software para generar las siguientes simulaciones:



Figura 13: Modelo de radiación Longley-Rice con una potencia de radiación de -55dbm a -5dBm ubicando el TX en los laboratorios de la Universidad Autónoma de la Ciudad de México (UACM) sede San Lorenzo Tezonco (SLT), Coordenadas [19.3128513,-99.0577421].

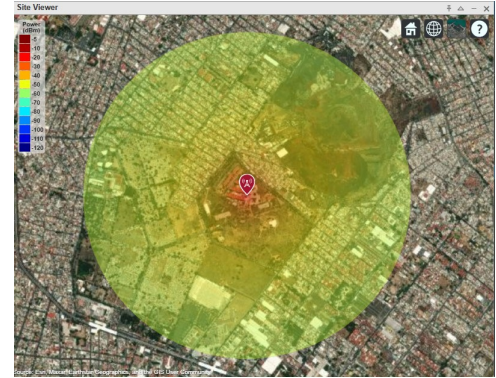


Figura 14: Modelo FreeSpace representando la cobertura de transmisión con una potencia de entre -55 dBm y -5 dBm ubicando el TX en los laboratorios de la Universidad Autónoma de la Ciudad de México (UACM) sede San Lorenzo Tezonco (SLT), Coordenadas [19.3128513,-99.0577421].

3.3. Procesamiento y almacenamiento de datos en el servidor:

Una vez que los datos son recibidos en el servidor central, pueden ser procesados, almacenados y utilizados según sea necesario. Esto puede incluir la actualización de bases de datos, la generación de informes o la activación de acciones automáticas basadas en los datos recibidos.

Para el servidor se instaló una versión de Debian 12 y un servidor Apache v2.4.57, realizando la configuración de un servidor MySQL para alojar todos los datos obtenidos, permitiendo la gestión de dicha información para mejorar su calidad, en la Fig.15, se muestra la interfaz WEB diseñada para la consulta de datos por día o lectura por sensor.

TABLA DE SENSORES					
Id	Fecha	Humedad	Solar	Temperatura	pH
240	08-06-2024	0	330	28.43	5.64
241	08-06-2024	0	345	28.79	5.64
242	08-06-2024	0	345	28.65	5.63
243	08-06-2024	0	320	29.3	5.63
244	08-06-2024	0	323	29.3	5.63
245	08-06-2024	0	321	30.04	5.63
246	08-06-2024	0	352	31.26	5.63
247	08-06-2024	0	345	30.89	5.63
248	08-06-2024	1	345	29.3	5.64
249	08-06-2024	0	306	30.38	5.63
250	08-06-2024	0	323	29.79	5.63
271	08-06-2024	0	158	30.04	5.63
272	08-06-2024	0	289	30.14	5.63
273	08-06-2024	0	362	28.43	5.65

Figura 15: Entorno WEB del sistema SIGACI.

Es importante tener en cuenta la seguridad durante todo el proceso de transmisión de datos. Esto puede implicar el cifrado de los datos transmitidos mediante *LoRa* y el uso de protocolos de comunicación seguros en el servidor central para proteger los datos recibidos.

Finalmente, en la tabla 3.3 se muestra la lista de materiales y su costo final.

La implementación del sistema de monitoreo agrícola basado en *IoT* demostró ser altamente eficaz en la captura y transmisión de datos ambientales cruciales para la gestión de cultivos. Los sensores utilizados proporcionaron mediciones precisas y consistentes, cubriendo variables clave como humedad, pH, temperatura y radiación solar. La comunicación inalámbrica, soportada por el módulo *LoRa*, una transmisión confiable de los datos hacia un servidor central.

Uno de los aspectos destacados del sistema es la interfaz de usuario desarrollada, que facilita el acceso a los datos recopilados y soporta la toma de decisiones informadas por parte de los agricultores. Esta interfaz permite una visualización de las condiciones de los cultivos, lo cual es crucial para optimizar el riego y detectar posibles afectaciones tempranamente.

El sistema también incluyó la instalación de un servidor en una Raspberry Pi 4B, con Sistema Operativo Debian 12 y un servidor Apache para alojar los datos obtenidos del módulo ESP32. La configuración de un servidor MySQL permitió la gestión eficiente de la información, mejorando su calidad y accesibilidad.

Las pruebas de validación y efectividad se realizaron de manera remota, confirmando el correcto funcionamiento de cada sensor y la confiabilidad en el envío de datos.

4. Conclusiones

El presente trabajo resalta cómo la implementación de tecnologías *IoT* puede revolucionar el sector agrícola, ofreciendo herramientas avanzadas para la gestión inteligente y sostenible de los cultivos. A través del desarrollo de un sistema de monitoreo agrícola utilizando el microcontrolador ESP32 y una variedad de sensores, se ha demostrado que es posible

optimizar el uso de recursos y mejorar significativamente la productividad. La transmisión de datos mediante el módulo *LoRa* permite una monitorización remota y eficiente, brindando a los agricultores una visión detallada del estado de sus cultivos.

El análisis de otros proyectos similares revela que el Sistema de Gestión Agrícola con Control Inteligente (*SIGACI*) ofrece mejoras sustanciales en comparación con enfoques anteriores. Mientras que algunos proyectos dependen de tecnologías más limitadas como Wi-Fi o SCADA, *SIGACI* utiliza una combinación de *LoRa* y Wi-Fi, proporcionando una mayor cobertura y una mejor eficiencia energética. Además, la arquitectura del sistema, que incluye nodos de sensores, un *Gateway*, un servidor y un actuador, permite una gestión más compleja y precisa de los datos ambientales.

Las ventajas de *SIGACI* son evidentes en su capacidad para proporcionar datos facilitando la toma de decisiones informadas y oportunas. La integración de una interfaz web moderna e intuitiva mejora la accesibilidad y la interpretación de los datos, haciendo que el sistema sea más útil y eficaz para los usuarios. Asimismo, la inclusión de algoritmos de aprendizaje automático en algunos aspectos del sistema permite una optimización continua de los recursos agrícolas.

Sin embargo, se han identificado algunas desventajas en otros métodos de monitoreo agrícola que deben ser considerados. La dependencia de sistemas como SCADA y LabVIEW puede aumentar los costos y la complejidad operativa, mientras que la falta de integración con tecnologías *IoT* avanzadas limita la capacidad de estos sistemas para proporcionar un monitoreo en tiempo real y una gestión óptima de los recursos naturales. Además, la escalabilidad y la flexibilidad de los sistemas tradicionales son menores en comparación con las soluciones basadas en *IoT* como *SIGACI*.

En conclusión, la adopción de tecnologías *IoT* en la agricultura representa un paso crucial hacia una producción más sostenible y eficiente. La capacidad de monitorear y controlar las condiciones ambientales de los cultivos no solo mejora los rendimientos, sino que también contribuye a la preservación de los recursos naturales. A medida que avanzamos en el desarrollo de soluciones innovadoras basadas en *IoT*, es fundamental seguir investigando y perfeccionando estos sistemas para enfrentar los desafíos emergentes en la agricultura y asegurar la seguridad alimentaria a nivel global.

Referencias

Devices, A. (2024). Uart: A hardware communication protocol understanding universal asynchronous receiver/transmitter.

Ebyte (2020). Introduction to lora spread spectrum technology. Ebyte.

Electrónica, P. (2012).

Etheridge, I. (2023). Uart explained; diligent blog.

FAO (2024a). Alimentación y agricultura sostenibles. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura.

FAO (2024b). Alimentación y agricultura sostenibles. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura.

GmbH., A.-D. V. (2021). Hygrometer modul v1.2 datenblatt.

Gordillo, G. y A., C. (2021). Red de sensores inalámbricos bajo protocolo lora y gestión de procesos para la analítica de datos mediante meta sistema operativo para monitoreo ambiental en invernaderos.

Tabla 3: Costo de materiales empleados.

Material	Precio (USD)	Precio (MXN)	Cantidad
ESP32	10.00	180.00	2
Resistencias 10K	0.10	1.80	20
Fotoresistencias	0.39	7.00	20
Raspberry Pi	35.00	630.00	1
Módulo LoRa E220	12.00	216.00	2
Sensor de Humedad	1.67	30.00	1
Sensor de Temperatura	1.56	28.00	1
Sensor de pH	7.22	130.00	1
Shield de ESP32	2.78	50.00	1
Amplificadores Operacionales	0.39	7.00	10
Reguladores de Voltaje	0.67	12.00	5
Cables	0.50	9.00	10 metros
Soldadura Estaño	3.00	54.00	5 metros
Total	115.89	2110.00	

Instruments, T. (2000). Lm35: Precision centigrade temperature sensors (snis159f).

J., C. T. J. y Mañay Quinatoa, A. O. (2023). Implementación de un sistema de monitoreo de ph aplicado a un invernadero de la zona alta sector salache.

Ltd, R. P. (2020). Raspberry pi compute module 4.

MathWorks (2024). rfprop.longleyrice. En *MathWorks*.

Moreno, C. A. T., Blasco, R., Nebra, R. C., y Marco, . M. (2019). Evaluación de la modulación lora en la banda de 433 mhz para monitorización en exteriores. *DYNA New Technologies*, 6(1):11.

Odunlade, E. (2020). Meet the \$8 esp32-s2-saola-1 development board from espressif - electronics-lab.com — electronics-lab.com.

OMS (2021). Informe de las naciones unidas. Organización Mundial de la

Salud.

Project, F. (2019). *Modulación por desplazamiento de frecuencia*. FLU Project.

Qiangwei (2015). Manual de usuario del medidor de ph ph-4502c (2ª ed.).

Rodríguez, J. L. y Suero, S. C. (1995). *Modulación de señales digitales*. Universidad Politécnica de Sevilla, Departamento de Tecnología Electrónica.

Rohde y Schwarz (2024). Entendiendo el uart.

Santiago, S. y C., J. (2021). *Integración de sensores y diseño de enlace de datos punto a punto de largo alcance, basado en tecnología LoRa y bluetooth*. Tesis doctoral, Universidad de San Carlos de Guatemala.

Serna, S., Montoya, B., y Osorio, W. (2012). Monitoreo del ph y fósforo soluble en la rizosfera de árboles de aguacate en el norte y oriente antioqueño. *Suelos Ecuatorianos*, 42(2):186–190.