

PROPUESTA DE UN INVERNADERO INTELIGENTE AEROPÓNICO

Data de submissão: 29/10/2024

Data de aceite: 02/12/2024

**Beatriz Eugenia Silva y Rodríguez
García**

Instituto Internacional de Aguascalientes
Tecnológico Nacional de México – Instituto
Tecnológico de San Luis Potosí San Luis
Potosí – San Luis Potosí
<https://orcid.org/0000-0002-0905-932X>

Jorge Norberto Mondragón Reyes

Instituto Internacional de Aguascalientes
Tecnológico Nacional de México –
Instituto Tecnológico de Aguascalientes
Aguascalientes – Aguascalientes
<http://orcid.org/0009-0006-2372-0942>

Marco Antonio Hernández Vargas

Instituto Internacional de Aguascalientes
Tecnológico Nacional de México –
Instituto Tecnológico de Aguascalientes
Aguascalientes – Aguascalientes
<https://orcid.org/0000-0002-8146-9307>

César Dunay Acevedo Arreola

Tecnológico Nacional de México, Instituto
Tecnológico de Aguascalientes Instituto
Internacional de Aguascalientes
Aguascalientes – México
<https://orcid.org/0009-0001-9370-2997>

y sistemas que permiten la comunicación, el intercambio de información y la conectividad global. La integración del Internet de las Cosas (IoT) y la Inteligencia Artificial (IA) en la agricultura han revolucionado la manera en que se gestionan los recursos y se optimizan las prácticas agrícolas. Mediante el uso de sensores conectados, sistemas de monitorización en tiempo real y análisis de datos avanzados, los agricultores pueden tomar decisiones informadas que mejoran la eficiencia y la sostenibilidad de sus cultivos. La IA permite predecir condiciones climáticas, detectar plagas y enfermedades de manera temprana y ajustar automáticamente el riego y la fertilización, lo que reduce el desperdicio de recursos y aumenta la productividad. En conjunto, estas tecnologías no solo mejoran la rentabilidad, sino que también contribuyen a la seguridad alimentaria y a la protección del medio ambiente. El objetivo de este proyecto de investigación es gestionar las diferentes variables físicas tales como temperatura, humedad y luminosidad que intervienen en un invernadero aeropónico mediante el uso de Internet de las Cosas y Lógica Difusa. Esta propuesta se ha implementado en un prototipo de invernadero de bajo costo donde se ha

RESUMEN: Las tecnologías de Internet abarcan una amplia gama de herramientas

colocado un banco de sensores gestionado a través de la plataforma de automatización de código abierto Home Assistant (HA). El invernadero aeropónico se puede controlar de manera local (Computación en la Niebla) o desde cualquier lugar con una conexión a Internet vía VPN (Computación en la Nube). Con este tipo de propuesta se pretende acelerar el proceso de crecimiento de los productos agrícolas que se coloquen dentro del invernadero. La implementación de este proyecto será en dos fases. La primera fase consistirá en la construcción del invernadero aeropónico junto con el banco de sensores, el sistema central de procesamiento, conectividad del banco de sensores a la plataforma Home Assistant y la conectividad remota al invernadero. En la segunda fase, se implementará la lógica difusa para la gestión automática del banco de sensores y el control de la luz ultravioleta para la germinación de diferentes tipos de productos agrícolas. En esta propuesta se muestran los resultados de la primera fase del proyecto.

PALABRAS-CLAVE: Invernadero aeropónico, Internet de las Cosas, Inteligencia Artificial, Lógica Difusa, Sensor.

PROPOSAL FOR AN AEROPONIC SMART GREENHOUSE

ABSTRACT: Internet technologies encompass a wide range of tools and systems that enable communication, information sharing and global connectivity. The integration of the Internet of Things (IoT) and Artificial Intelligence (AI) in agriculture has revolutionized the way resources are managed, and farming practices are optimized. Using connected sensors, real-time monitoring systems and advanced data analytics, farmers can make informed decisions that improve the efficiency and sustainability of their crops. AI makes it possible to predict weather conditions, detect pests and diseases early, and automatically adjust irrigation and fertilization, which reduces resource waste and increases productivity. Together, these technologies not only improve profitability, but also contribute to food safety and environmental protection. The objective of this research project is to manage the different physical variables involved in an aeroponics using Internet of Things and Fuzzy Logic such as, temperature and humidity. This proposal has been implemented in a low-cost greenhouse prototype where a bank of sensors has been placed and managed through the open-source automation platform Home Assistant (HA). The aeroponic greenhouse can be controlled locally (Fog Computing) or from anywhere with an Internet connection via VPN (Cloud Computing). This type of proposal is intended to accelerate the growth process of the agricultural products placed inside the greenhouse. The implementation of this project will be in two phases. The first phase will consist of the construction of the aeroponic greenhouse together with the sensor bank, the central processing system, connectivity of the sensor bank to the Home Assistant platform, remote connectivity to the greenhouse and the implementation of fuzzy logic in the management of the sensor bank. In the second phase, the growth time of an agricultural product inside the aeroponic greenhouse will be compared with the growth of the same product outside the greenhouse. This proposal shows the results of the first phase of the project.

KEYWORDS: Aeroponic greenhouse, Internet of Things, Artificial Intelligence, Fuzzy Logic, Sensor.

1 | INTRODUCCION

La agronomía ha evolucionado significativamente en las últimas décadas debido a la necesidad creciente de soluciones sostenibles para la producción de alimentos, dado el aumento poblacional y el cambio climático. Los enfoques tradicionales de la agricultura se han complementado con innovaciones tecnológicas, como la agricultura de precisión, los sistemas de riego avanzados y la utilización de nuevas técnicas de cultivo, como la hidroponía y la aeroponía (FAO, 2021).

Una tendencia destacada es el uso de sensores, drones y el procesamiento masivo de datos para mejorar la eficiencia de los cultivos y reducir el uso de recursos naturales. Estas tecnologías permiten un monitoreo más detallado de las condiciones del suelo, el clima y la salud de las plantas, lo que maximiza el rendimiento y minimiza el impacto ambiental (Brady & Weil, 2019).

La agricultura vertical y los sistemas de cultivo sin suelo, como la aeroponía, están ganando terreno en regiones donde la disponibilidad de tierra y agua es limitada. La aeroponía, en particular, ha demostrado ser una técnica prometedora para el cultivo de una amplia variedad de plantas, especialmente en entornos controlados, como invernaderos o instalaciones urbanas. Este método optimiza el uso del agua y los nutrientes, lo que lo convierte en una opción altamente eficiente para el futuro de la agricultura sostenible (Bailey- Serres et al., 2019).



Figura 1. Bustanica, la granja vertical más grande del mundo (Fuente: www.xataka.com).

En México, la agronomía también ha experimentado avances importantes, impulsados por la necesidad de mejorar la productividad agrícola y enfrentar los desafíos climáticos y de recursos hídricos. La agricultura de precisión ha empezado a implementarse en varias regiones del país con las técnicas como la aeroponía, aunque en sus primeras fases de adopción, han despertado interés tanto en la academia como en empresas agrícolas que buscan mejorar la eficiencia del uso del agua (Sánchez-Lizarraga & Carrillo-López, 2020).

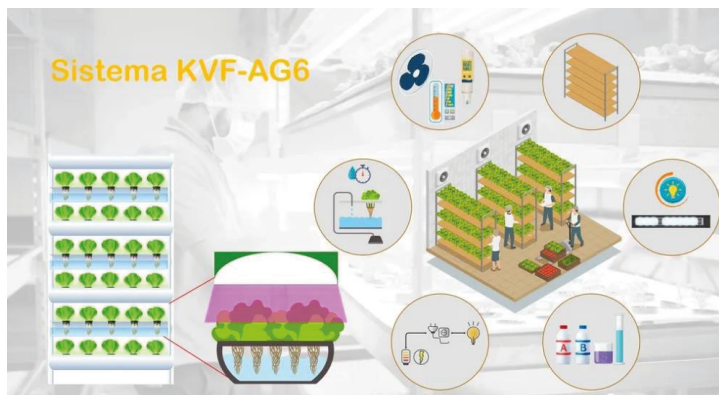


Figura 2. Karma Verde Fresh, un ejemplo de agricultura vertical en México (Fuente: <https://karmaverdefresh.com/>).

El gobierno y las instituciones académicas han fomentado la investigación y el desarrollo en áreas relacionadas con la agricultura sostenible, y la Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural (SADER) ha promovido proyectos de innovación tecnológica en el sector agrícola, incluidos los sistemas de cultivo sin suelo. Los estados con mayor adopción de estas técnicas son aquellos con escasez de agua o tierras agrícolas, como Baja California y Zacatecas, donde los sistemas aeropónicos se están considerando para cultivos de alto valor, como las hortalizas y plantas medicinales (Martínez & Pérez, 2021).

La propuesta del invernadero aeropónico basado en el Internet de las Cosas (IoT), es un prototipo de bajo costo que está compuesto por un banco de sensores, un microcontrolador y plataforma integradora Home Assistant (HA). El banco de sensores se utilizará para monitorizar las principales variables físicas del invernadero tales como temperatura, humedad y luminosidad del ambiente del entorno aeropónico. La función principal del microcontrolador será monitorizar y procesar las variables físicas anteriores y enviar el resultado al HA.

El HA permitirá mostrar en un entorno de aplicación móvil, el estado de cada uno de los sensores, actuadores y acceso remoto al invernadero.

2 | MARCO TEÓRICO

La aeroponía es un método avanzado de cultivo sin suelo en el cual las raíces de las plantas se suspenden en el aire y son rociadas con una solución rica en nutrientes. Esta técnica, que surge como una evolución de la hidroponía, ha ganado interés debido a su capacidad para maximizar el uso de agua y nutrientes, reducir el espacio requerido para el cultivo y evitar los problemas asociados al uso de suelo (Kozai et al., 2020; Sharma et al., 2019; Lakhier et al., 2018; Zhang & Ling, 2021).



Figura 3. Torres de cultivo aeropónico (Fuente: www.agrohuerto.com)

El desarrollo de la aeroponía ha estado impulsado por la necesidad de encontrar soluciones agrícolas más sostenibles frente a los problemas derivados del cambio climático, la escasez de agua y la pérdida de tierras cultivables. Esta técnica es especialmente útil en ambientes controlados como invernaderos y sistemas de agricultura vertical, donde el uso eficiente de los recursos es prioritario.

Uno de los principales avances de la aeroponía es su capacidad para utilizar hasta un 95% menos agua que los métodos agrícolas tradicionales y su potencial para aumentar la velocidad de crecimiento de las plantas, debido a la alta oxigenación de las raíces. Además, los cultivos aeropónicos pueden producir alimentos durante todo el año independientemente de las condiciones climáticas externas, lo que los convierte en una opción viable para la producción en áreas urbanas y regiones con condiciones ambientales desfavorables.

A pesar de sus beneficios, la aeroponía enfrenta desafíos como el alto costo inicial de la infraestructura y el equipamiento necesario, así como la necesidad de un manejo técnico especializado para mantener los sistemas funcionando de manera óptima. La interrupción del suministro de nutrientes o del sistema de rociado puede causar daños rápidos a las plantas, lo que limita su adopción masiva.

Los avances en automatización y monitoreo han mejorado la viabilidad de la aeroponía, reduciendo la dependencia del manejo manual. Sin embargo, la falta de estandarización en la tecnología y la poca difusión de conocimientos sobre el tema en algunos países siguen siendo barreras para su implementación global (Medina & Gutiérrez, 2022).

Por otro lado, el Internet de las Cosas (IoT) ha crecido exponencialmente en la última década, transformando la manera en que interactuamos con el mundo digital y físico. IoT se refiere a la interconexión de dispositivos y objetos cotidianos a través de internet, lo que les permite recopilar, enviar y recibir datos sin intervención humana directa. El avance en sensores, redes inalámbricas y tecnologías de procesamiento ha facilitado esta expansión

(Atzori et al., 2020; Xu et al., 2019; Gubbi et al., 2021; Bello-Orgaz et al., 2021).

En la agricultura, el IoT ha permitido el monitoreo remoto de cultivos, e análisis del uso de agua y la automatización de sistemas de riego, lo que optimiza el rendimiento de las cosechas en un entorno donde el cambio climático y la escasez de recursos son problemas crecientes. Sin embargo, en México, los principales desafíos siguen siendo la infraestructura de telecomunicaciones y el alto costo de implementación de tecnologías IoT en comparación con otros países.

Por otro lado, Home Assistant (HA) es una plataforma de automatización de código abierto diseñada para monitorear, controlar y automatizar dispositivos inteligentes en un hogar. Desde su lanzamiento en 2013, ha ganado popularidad por su flexibilidad, amplia compatibilidad con una variedad de dispositivos y la posibilidad de operar de forma local, sin necesidad de depender de servicios en la nube. Esto proporciona una mayor privacidad y seguridad, una preocupación creciente en el ámbito del Internet de las Cosas (IoT) (Schneider, 2020; Gaur et al., 2021; Guo et al., 2021).

Con el objetivo de aumentar la velocidad de crecimiento de las plantas, este trabajo de investigación se centra, en su primera fase, en la implementación de un invernadero aeropónico de bajo costo basado en IoT.

3 | MATERIALES Y MÉTODOS

El diseño e implementación de la propuesta de invernadero inteligente ha sido orientado, en un principio, hacia el cultivo de rábanos, sin descartar la posibilidad de poder adaptarlo para otros cultivos incorporando nuevos sensores y actuadores.

El ciclo del cultivo del rábano depende de las condiciones climáticas, pudiendo encontrar desde 20 a más de 70 días. El desarrollo vegetativo tiene lugar entre los 6 y los 30° C. La temperatura óptima de germinación está entre 20 y 25° C (SIAP, 2023).

En la Figura 4 se presenta la arquitectura del invernadero inteligente indicando el alcance de procesamiento de las variables físicas involucradas, las herramientas tecnológicas utilizadas y los protocolos de comunicación inmersos en la transmisión de datos.

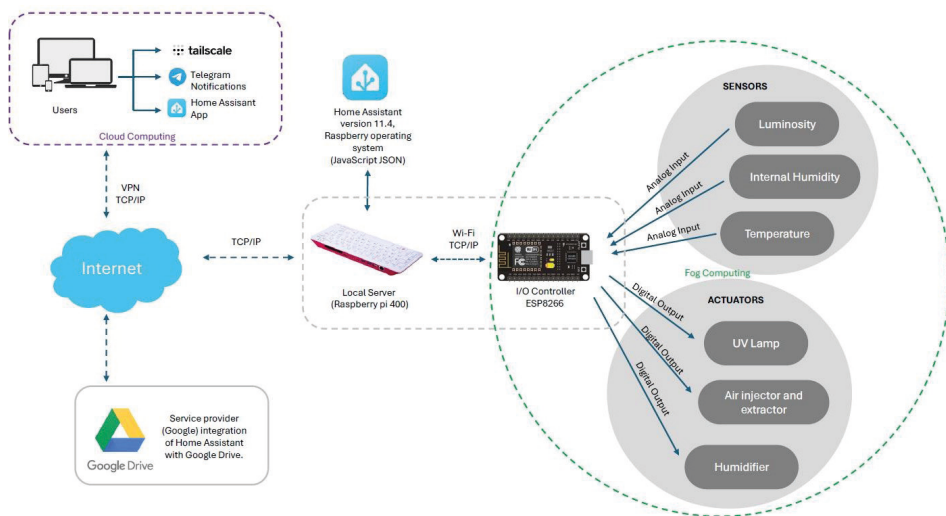


Figura 4. Arquitectura del Invernadero Inteligente basado en Lógica Difusa (Diseño propio).

En el extremo derecho de la Figura 4, se muestra el banco de sensores, actuadores gestionados por el microcontrolador ESP8266. En esta primera versión se han utilizado los sensores DHT22 para monitorizar la temperatura ambiental dentro del invernadero, el sensor DHT11 para monitorizar la humedad dentro de las torres aeropónicas y el panel solar PS-006 para monitorizar la intensidad de la luz. Con base en los valores obtenidos por los sensores anteriores, el invernadero podrá gestionar de manera automática la lámpara UV ($\lambda=385-400$ nm), el inyector y extractor de aire para mantener la temperatura interior entre 20 °C y 25 °C y los humidificadores de los tubos. La temperatura anterior se ha calibrado propiamente para los rábanos. La lámpara UV elegida es activada en caso de ausencia de luz natural.

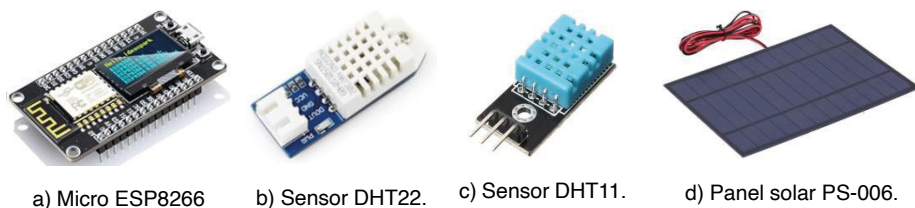


Figura 5. Microcontrolador y banco de sensores utilizados en la primera fase del invernadero.

La instalación del Home Assistant en el microcontrolador Raspberry Pi 400 como plataforma operativa, permitirá tanto la gestión del banco de sensores y actuadores de manera local, así como el acceso a los mismos desde cualquier otro lugar de Internet con una interface gráfica hacia el usuario bastante intuitiva.

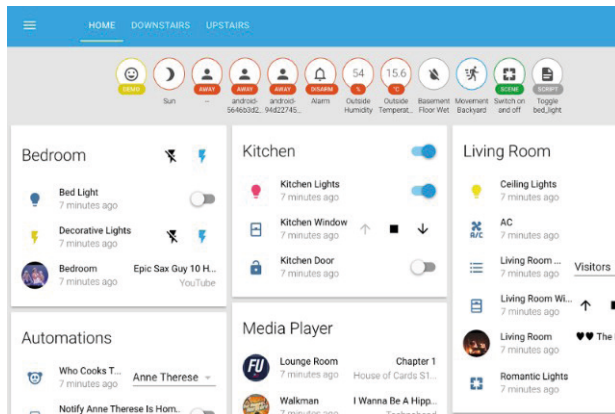


Figura 6. Ejemplo de una Interfaz Gráfica de Usuario (GUI) del Home Assistant personalizada (Fuente: <https://magazine.odroid.com>).

En el extremo izquierdo de la Figura 4, se observan las tecnologías que permiten la comunicación con el invernadero desde cualquier otro lugar utilizando la aplicación Home Assistant en cualquier dispositivo final tal como una computadora de escritorio, tableta o teléfono inteligente con acceso a Internet. La aplicación Telegram se usa como servicio de mensajería para enviar notificaciones sobre la operación del invernadero facilitando la comunicación inmediata y efectiva de cualquier evento relevante dentro del mismo y, finalmente, se utiliza la aplicación Tail para garantizar una comunicación segura via VPN con el microcontrolador Raspberry Pi 400 (Tailscale Inc, 2024).

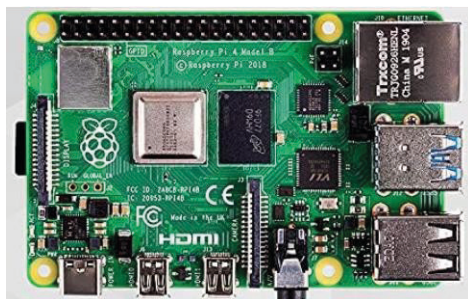


Figura 7. Microprocesador Raspberry Pi 4 utilizando a HA como sistema operativo.

Finalmente, mediante la integración de Home Assistant con Google Drive, permitirá hacer respaldos continuos de los datos generados por el invernadero.

4 | RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Se han planificado varias fases para la implementación de este proyecto de investigación. En esta primera fase se construyó la maqueta con una base de madera, tubos aeropónicos de PVC y un techo de polietileno para permitir el paso de la luz natural

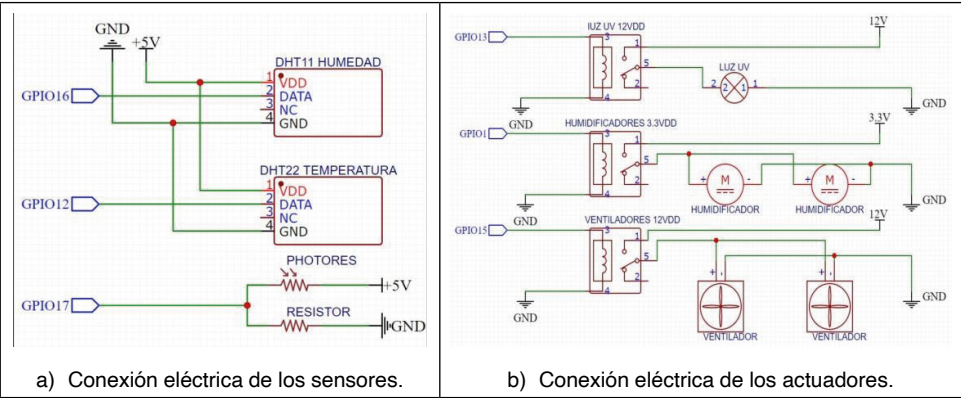
hacia las plántulas. Posteriormente se ha instalado todo el sistema de IoT conformado por el banco de sensores DHT12 y DHT11, el panel solar, los ventiladores (intractor y extractor), el microcontrolador ESP8266 y Raspberry Pi 4. En la Figura 8 se muestra tanto el diseño de la maqueta como del sistema IoT.



a) Diseño del Invernadero. b) Implementación del Invernadero.

Figura 8. Diseño e implementación de la maqueta del invernadero.

Ahora, en la Figura 9 se muestra el diagrama eléctrico general del Invernadero derivado de la conexión de los sensores, los actuadores y los microcontroladores.



a) Conexión eléctrica de los sensores. b) Conexión eléctrica de los actuadores.

Figura 9. Diagrama eléctrico general del Invernadero.

Para la gestión local o remota del invernadero, se ha utilizado como interfaz de usuario la plataforma Home Assistant (HA). El HA tiene la característica principal de ser una plataforma de código abierto diseñada para controlar y gestionar dispositivos inteligentes en el hogar. Justamente por ser de código abierto, en este proyecto se ha personalizado el HA para la gestión del invernadero. Otra de las principales características que ofrece HA es que permite la integración de una gran cantidad de dispositivos inteligentes de diferentes

fabricantes. Aunque en este proyecto HA hace la gestión de las variables físicas de humedad, luminosidad y temperatura del invernadero, asimismo permite escalar la gestión del invernadero en caso de aumentar y/o cambiar el control de las variables físicas para el manejo de otros tipos de semillas. En la siguiente figura se muestra el panel de control principal del Home Assistant junto con la gestión de las variables físicas del invernadero.



a) Panel principal del HA. b) Registro de temperatura dentro del invernadero. c) Registro de humedaddentro de los tubos.

Figura 10. Panel principal del Home Assistan para la gestión del invernadero.

Cabe la pena mencionar que la luz ultravioleta entra en acción de manera automática cuando se tiene una luz natural baja. En la Figura 11 se muestra el invernadero bajo la situación anterior.

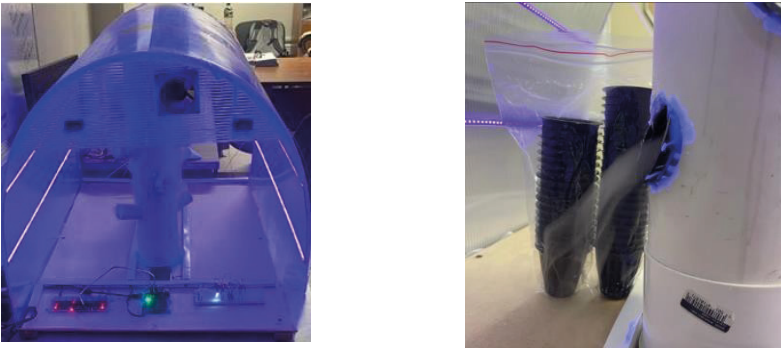


Figura 5. Funcionamiento automático de la luz UV y de la humidificación.

El usuario tiene la posibilidad de monitorizar constantemente la presencia de algún evento dentro del invernadero ya sea de manera local o remota via notificaciones del Telegram. En la siguiente figura se muestran algunos eventos tales como el estado de la temperatura, humedad, tiempo y calidad de exposición.



Figura 6. Interacción con el bot del Invernadero en Telegram para la monitorización de las principales variables físicas.

Como siguiente fase de este proyecto, se utilizará la lógica difusa para controlar todos los procesos de control generados dentro del invernadero. Por ejemplo, el proceso de control de temperatura interior, la sintonización de la luz ultravioleta dependiendo del tipo de germinación de semilla, la humedad de las torres, entre otras variables físicas.

5 | CONCLUSIONES

El uso del Internet de las Cosas en la agricultura ha revolucionado la manera en que gestionamos y optimizamos las operaciones agrícolas. Los sensores IoT permiten una monitorización en tiempo real de diversos parámetros críticos, como la humedad del suelo, la temperatura, la humedad ambiental. Esta capacidad de recopilación de datos precisa y continua facilita la toma de decisiones informadas, promoviendo prácticas agrícolas más

eficientes y sostenibles.

Implementar sensores IoT en la agricultura ofrece múltiples beneficios. Los agricultores pueden ajustar el riego y la temperatura con precisión, reduciendo el desperdicio de agua y nutrientes y mejorando el rendimiento de los cultivos. La siguiente fase de la implementación del Invernadero consistirá en la adopción de lógica difusa que, junto con el IoT, permitirá dar un gran paso hacia la agricultura de precisión; proporcionando herramientas avanzadas que ayudan a enfrentar los desafíos de la producción agrícola moderna y garantizando una gestión de recursos más responsable y eficaz.

REFERENCIAS

Atzori, L., Iera, A., & Morabito, G. (2020). The Internet of Things: A survey. *Computer Networks*, 54(15), 2787-2805.

Bailey-Serres, J., Parker, J. E., Ainsworth, E. A., Oldroyd, G. E. D., & Schroeder, J. I. (2019). Genetic strategies for improving crop yields. *Nature*, 575(7781), 109- 118.

Bello-Organ, G., Jung, J. J., & Camacho, D. (2021). Social big data: Recent achievements and new challenges. *Information Fusion*, 28, 45-49.

Brady, N. C., & Weil, R. R. (2019). *The Nature and Properties of Soils*. Pearson. FAO (2021). The future of food and agriculture: Trends and challenges. Rome. *Food and Agriculture Organization of the United Nations*

Gaur, A., Scotney, B., Parr, G., & McClean, S. (2021). Smart home technologies: Overview, analysis, and challenges. *IEEE Access*, 7, 90945-90972.

Gubbi, J., Buyya, R., Marusic, S., & Palaniswami, M. (2021). Internet of Things (IoT): A vision, architectural elements, and future directions. *Future Generation Computer Systems*, 29(7), 1645-1660.

Guo, X., Xu, L., & Li, S. (2021). Integration of IoT with Home Assistant for smart home automation. *Journal of Systems Architecture*, 104, 101713.

Kozai, T., Fujiwara, K., & Runkle, E. S. (2020). Plant Factory: An indoor vertical farming system for efficient quality food production. *Academic Press*.

Lakshari, I. A., Gao, J., Syed, T. N., Chandio, F. A., & Buttar, N. A. (2018). Modern plant cultivation technologies in agriculture under controlled environment: A review on aeroponics. *Journal of Plant Interactions*, 13(1), 338-352.

Martínez, L., & Pérez, G. (2021). Sistemas hidropónicos y aeropónicos en México: Innovación y sostenibilidad en la producción agrícola. *Ciencia y Tecnología Agropecuaria*, 22(2), 45-58.

Medina, G., & Gutiérrez, F. (2022). Innovación en sistemas de cultivo aeropónico para mejorar la producción agrícola. *Ciencia y Tecnología Agropecuaria*, 12(3), 91-104.

Sánchez-Lizarraga, A. L., & Carrillo-López, A. (2020). Agricultura de precisión y su impacto en la producción agrícola en México. *Revista Mexicana de Agronegocios*, 24(3), 123-133.

Schneider, D. (2020). Home Assistant for smart home control: An open-source approach. *IEEE Consumer Electronics Magazine*, 9(5), 45-48.

Sharma, N., Acharya, S., Kumar, K., Singh, N., & Chaurasia, O. P. (2019). Hydroponics as an advanced technique for vegetable production: An overview. *Journal of Soil and Water Conservation*, 18(4), 364-371.

SIAP. (2023). RÁBANO. Consultado Junio 24, 2024, de <https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/726314/Rabano.pdf>

Tailscale Inc. (2024). Secure, remote access to. <https://tailscale.com/>

Xu, L. D., He, W., & Li, S. (2019). Internet of Things in industries: A survey. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 10(4), 2233-2243.

Zhang, Y., & Ling, Q. (2021). Aeroponics: A tool for accelerated crop improvement. *Horticultural Science*, 26(2), 65-73.