



## CARRERA DE ESPECIALIZACIÓN EN INTERNET DE LAS COSAS

MEMORIA DEL TRABAJO FINAL

### **Monitoreo y gestión remota de red de sensores en invernaderos**

**Autor:**

**Ing. Facundo Andrioli Villa**

Director:

Dr. Pablo Ventura (UNC-KeyLab)

Jurados:

Nombre del jurado 1 (pertenencia)

Nombre del jurado 2 (pertenencia)

Nombre del jurado 3 (pertenencia)

*Este trabajo fue realizado en la ciudad de Monte Cristo,  
entre agosto de 2023 y diciembre de 2024.*



## *Resumen*

En la presente memoria se describe la implementación de una red de sensores basada en ESP-NOW en invernaderos para la recopilación de información en tiempo real destinada a la empresa Wentux. El trabajo tiene como objetivo mejorar el control y la eficiencia de los invernaderos, lo que permite a los usuarios acceder a los datos y gestionar alarmas desde cualquier lugar.

Se aplicaron conocimientos referidos a protocolos de comunicación, procesamiento de mensajes, desarrollo de aplicaciones web y gestión de datos en la nube.



## *Agradecimientos*

Esta sección es para agradecimientos personales y es totalmente **OPCIONAL**.



# Índice general

<b>Resumen</b>	<b>I</b>
<b>1. Introducción general</b>	<b>1</b>
1.1. Sistema de monitoreo y gestión en invernaderos . . . . .	1
1.1.1. Problemática actual . . . . .	1
1.1.2. Oportunidades de mejora . . . . .	1
1.2. Motivación . . . . .	2
1.3. Estado del arte . . . . .	2
1.4. Alcance y objetivos . . . . .	3
<b>2. Introducción específica</b>	<b>5</b>
2.1. Esquema general del sistema . . . . .	5
2.2. Tecnologías de hardware . . . . .	6
2.2.1. Microcontrolador . . . . .	6
2.2.2. Sensores . . . . .	6
2.3. Tecnologías de firmware . . . . .	7
2.3.1. MicroPython . . . . .	8
Elección de MicroPython . . . . .	8
2.4. Protocolos de comunicación . . . . .	8
2.4.1. Protocolo ESP-NOW . . . . .	8
2.4.2. Protocolo MQTT . . . . .	9
2.5. Aplicación web progresiva . . . . .	9
2.6. Servidor de internet de las cosas . . . . .	9
<b>3. Diseño e implementación</b>	<b>11</b>
3.1. Arquitectura del sistema . . . . .	11
3.2. Desarrollo del firmware . . . . .	11
3.3. Desarrollo de la aplicación web progresiva . . . . .	11
3.4. Implementación del servidor IoT . . . . .	11
3.5. Despliegue del sistema . . . . .	11
<b>4. Ensayos y resultados</b>	<b>13</b>
4.1. Banco de pruebas . . . . .	13
4.2. Prueba de componentes . . . . .	13
4.3. Pruebas sobre el firmware . . . . .	13
4.4. Pruebas sobre la aplicación web progresiva . . . . .	13
4.5. Pruebas sobre el servidor OpenRemote . . . . .	13
<b>5. Conclusiones</b>	<b>15</b>
5.1. Conclusiones generales . . . . .	15
5.2. Próximos pasos . . . . .	15
<b>Bibliografía</b>	<b>17</b>





# Índice de figuras

2.1. Diagrama en bloques del sistema. . . . .	5
2.2. Módulo ESP32-C3. . . . .	6
2.3. Sensor LM35. . . . .	7
2.4. Sensor HTU21. . . . .	7
2.5. Sensor BME280. . . . .	7
2.6. Sensor MH-Z19. . . . .	7
2.7. Modelo ESP-NOW. . . . .	9



# Índice de tablas

1.1. Comparación de soluciones comerciales . . . . .	2
--	---



*Dedicado a... [OPCIONAL]*



# Capítulo 1

## Introducción general

En este capítulo se presenta una visión general de los sistemas de monitoreo y gestión de invernaderos, abordando los desafíos actuales y las oportunidades de mejora. Además, se describen las motivaciones del trabajo, sus objetivos y el alcance de la solución propuesta.

### 1.1. Sistema de monitoreo y gestión en invernaderos

La gestión eficiente de los invernaderos es crucial para maximizar la productividad agrícola, especialmente en un contexto global donde la demanda de alimentos sigue en aumento. Los invernaderos, al ofrecer un entorno controlado para el cultivo, permiten optimizar las condiciones de crecimiento de las plantas. Sin embargo, la evolución de las tecnologías de monitoreo y gestión ha revelado tanto desafíos persistentes como nuevas oportunidades para mejorar estos sistemas.

#### 1.1.1. Problemática actual

La producción agrícola en invernaderos ha evolucionado considerablemente en respuesta a la creciente demanda de cultivos y al aumento de la población mundial. En este contexto, enfrentan desafíos claves que afectan la eficiencia y productividad:

- Descentralización geográfica: la supervisión de invernaderos dispersos resulta difícil, ya que complica la obtención y el análisis de datos en tiempo real y puede derivar en respuestas tardías a cambios críticos en el entorno de cultivo.
- Falta de unificación en la gestión: los sistemas actuales suelen ser fragmentados, lo que dificulta la implementación de un control eficiente y coordinado en todos los aspectos del cultivo.
- Limitaciones tecnológicas: la infraestructura existente no siempre soporta la recopilación continua y precisa de datos ambientales, lo que afecta la toma de decisiones informada.

#### 1.1.2. Oportunidades de mejora

A la luz de estos desafíos, surgen varias oportunidades para mejorar la eficiencia y efectividad de los sistemas de monitoreo y gestión en invernaderos, orientadas a satisfacer las necesidades tanto de los productores como de la industria en general:

- Implementación de tecnologías avanzadas: la integración de sensores y sistemas de monitoreo más sofisticados puede permitir una recopilación de datos más precisa y en tiempo real, que provoca una mejora en la capacidad de respuesta ante cambios en el entorno.
- Centralización y unificación del control: la adopción de soluciones que permitan un control unificado y centralizado de múltiples invernaderos puede facilitar la gestión y optimizaría los recursos, asegurando condiciones óptimas de cultivo en todas las instalaciones.
- Mejora en la accesibilidad de la información: desarrollar interfaces más accesibles para los usuarios puede mejorar la capacidad para monitorear y ajustar condiciones de cultivo de manera eficiente desde cualquier ubicación.

## 1.2. Motivación

La motivación para este trabajo surge de los desafíos que enfrentan los agricultores al gestionar invernaderos dispersos geográficamente. La falta de soluciones integrales para el monitoreo y control remoto limita la eficiencia y productividad. Este trabajo busca desarrollar una solución basada en Internet de las cosas (IoT) que permita un control centralizado y optimizado, alineado con las necesidades de Wentux Tecnoagro y con el interés de aplicar tecnologías IoT para mejorar la gestión agrícola.

## 1.3. Estado del arte

En el mercado actual existen diversas empresas que ofrecen soluciones comerciales diseñadas para optimizar la gestión de invernaderos. Estas herramientas proporcionan una amplia gama de funcionalidades que permiten el control automatizado de parámetros como temperatura, humedad, riego, y ventilación. En la tabla 1.1 se muestra una comparativa de algunas de las principales soluciones comerciales disponibles, destacando sus características.

TABLA 1.1. Comparación de soluciones comerciales.

Empresa	Características
Growcast [1]	Sistema de monitoreo y automatización ambiental con sensores para temperatura, humedad, CO <sub>2</sub> , y capacidades de control de riego, iluminación y ventilación. Incluye una aplicación móvil para el monitoreo y control en tiempo real.
Pulse Grow [2]	Sistema especializado en la medición precisa de temperatura, humedad, punto de rocío y déficit de presión de vapor (VPD). Ofrece alertas y ajustes remotos a través de una aplicación móvil.
TrolMaster [3]	Sistema modular que permite el control ambiental, de riego y fertilización. Ofrece un sistema altamente flexible y escalable, permitiendo la integración de múltiples dispositivos para una gestión avanzada de invernaderos.



Estas empresas destacan por su capacidad para integrar tecnología avanzada en el control y monitoreo de invernaderos, que facilita una gestión eficiente y adaptada a las necesidades específicas de cada operación agrícola.

## 1.4. Alcance y objetivos

El objetivo principal de este trabajo fue implementar un sistema que permitiera el monitoreo y la gestión remota de invernaderos, que mejora la eficiencia y la capacidad de respuesta en la gestión de cultivos. Esta propuesta incluyó la implementación de una red de sensores en los invernaderos que recopilan información en tiempo real. Además, se desarrolló una aplicación web progresiva (PWA) para el monitoreo local y un servidor IoT para la gestión remota de datos. Este sistema permitió a los usuarios acceder a la información y controlar los invernaderos desde cualquier lugar, facilitando una gestión eficiente de datos y alarmas.

Dentro del alcance de este trabajo se incluyó:

- El diseño y desarrollo de un protocolo de comunicación basado en ESP-NOW entre los nodos sensores y el sistema embebido central.
- La creación de una PWA para el monitoreo local de los equipos en los invernaderos.
- La implementación de un servidor en la nube para el almacenamiento y gestión de datos recopilados por los sensores.
- El establecimiento de la comunicación cliente-servidor a través del protocolo MQTT para la transmisión de datos desde el sistema embebido central al servidor en la nube.
- La posibilidad de control remoto de los invernaderos y sus dispositivos desde la aplicación web.
- La gestión de alarmas y administración de los datos recibidos por los dispositivos conectados.

El presente trabajo no incluyó:

- El desarrollo del hardware del sistema embebido central, que ya estaba funcionando.
- Mantenimiento y actualizaciones a largo plazo del sistema.



## Capítulo 2

# Introducción específica

En este capítulo se presentan las tecnologías utilizadas en el desarrollo de este trabajo, detallando sus características fundamentales de funcionamiento y sus especificaciones técnicas.

### 2.1. Esquema general del sistema

En la figura 2.1, que se presenta a continuación, se muestra el diagrama en bloques del sistema, en el que se pueden observar:

- Red de sensores: recopila datos del entorno del invernadero.
- Nodo central: recibe datos de los sensores ESP-NOW y los envía al servidor a través de MQTT.
- Comunicación MQTT: facilita la transferencia de datos entre el módulo central y el servidor.
- Servidor IoT: almacena y procesa los datos recibidos de los sensores.
- PWA: permite el monitoreo y control del sistema en la red local.
- Nodos sensores y actuadores: recopilan datos y controlan dispositivos en el invernadero.
- Usuario remoto: accede a los datos recopilados a través del servidor IoT.

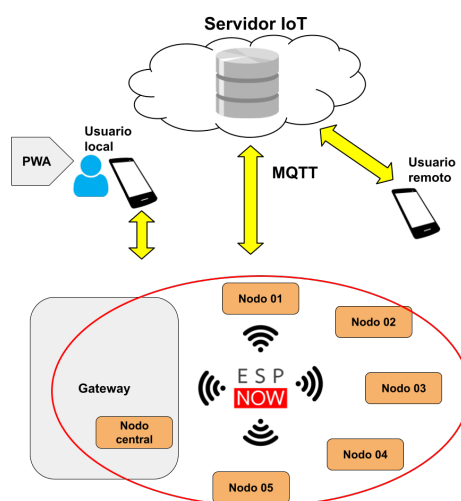


FIGURA 2.1. Diagrama en bloques del sistema.

## 2.2. Tecnologías de hardware

Los componentes de hardware fueron impuestos por la empresa Wentux, por lo que no se tuvo ninguna influencia en la selección del microcontrolador y los sensores.

### 2.2.1. Microcontrolador

Para los nodos sensores y el gateway del sistema, se utilizó la placa de desarrollo ESP32-C3 de Espressif Systems, un microcontrolador eficiente y versátil, ideal para aplicaciones de IoT. Cuenta con un núcleo RISC-V de 32 bits, que combina rendimiento y bajo consumo de energía, lo que optimiza la operación de los dispositivos en el sistema de monitoreo y gestión. Este microcontrolador admite tanto Wi-Fi como Bluetooth 5 (LE), ofreciendo múltiples opciones de conectividad inalámbrica. Además de estas tecnologías, soporta el protocolo ESP-NOW, una solución de comunicación inalámbrica propietaria de Espressif [4].

En la figura 2.2 se puede observar el módulo.



FIGURA 2.2. Módulo ESP32-C3.

El ESP32-C3 también ofrece soporte para actualizaciones OTA (Over-the-Air), lo que facilita la actualización remota del firmware. Además, su amplio conjunto de interfaces de comunicación como UART, I2C, SPI, y ADC permite la integración con diversos sensores y actuadores, necesarios para la operación del sistema en el invernadero.

La información completa sobre el microcontrolador y sus especificaciones técnicas está disponible en el sitio web oficial de Espressif [5].

### 2.2.2. Sensores

A continuación, se describen brevemente los sensores utilizados en el sistema.

- Sensor LM35 [6]: es un sensor de temperatura analógico que proporciona una salida de voltaje linealmente proporcional a la temperatura. En la figura 2.3 se puede observar el sensor.

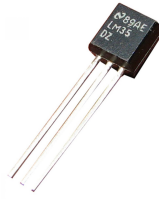


FIGURA 2.3. Sensor LM35.

- Sensor HTU21 [7]: es un sensor digital de humedad relativa y temperatura. Comunica sus lecturas a través de una interfaz I2C. En la figura 2.4 se puede observar el sensor.

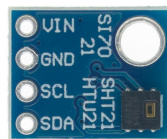


FIGURA 2.4. Sensor HTU21.

- Sensor BME280 [8]: es un sensor ambiental que mide la presión atmosférica, la humedad y la temperatura. Se comunica a través de I2C o SPI. En la figura 2.5 se puede observar el sensor.



FIGURA 2.5. Sensor BME280.

- Sensor MH-Z19 [9]: es un sensor de dióxido de carbono basado en tecnología infrarroja no dispersiva (NDIR). La información se puede obtener a través de las interfaces UART o PWM. En la figura 2.6 se puede observar el sensor.

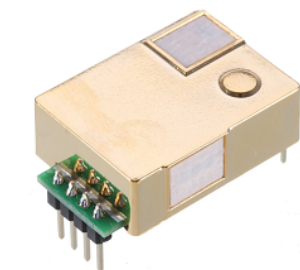


FIGURA 2.6. Sensor MH-Z19.

## 2.3. Tecnologías de firmware

En esta sección se presenta la tecnología utilizada en el trabajo, explicando qué es y las razones de su elección.

### 2.3.1. MicroPython

MicroPython es una versión reducida y optimizada de Python 3, escrita en C, diseñada para ejecutarse en microcontroladores con recursos limitados (como la memoria y la capacidad de procesamiento). A diferencia de otros lenguajes de programación, MicroPython es interpretado, lo que significa que el código no se compila previamente, sino que se interpreta durante la ejecución.

Cuenta con un compilador cruzado, que convierte scripts de Python en bytecode que puede ser ejecutado eficientemente en hardware. Además, MicroPython incluye una biblioteca estándar completa, adaptada para trabajar en estos entornos limitados, lo que permite a los desarrolladores escribir código de alto nivel sin tener que recurrir a lenguajes más complejos como C o ensamblador.

Al ser de código abierto, MicroPython está disponible para ser usado y modificado por cualquier persona. Este enfoque abierto, junto con su capacidad de funcionar en hardware limitado, lo hace ideal para la creación de aplicaciones embebidas [10] [11].

#### Elección de MicroPython

MicroPython fue elegido para este trabajo debido a varias ventajas clave:

- Desarrollo ágil: al ser una versión optimizada de Python, permite un desarrollo rápido y eficiente, lo que es esencial para iterar y ajustar la funcionalidad del sistema y agregar nuevas características sin demoras.
- Pruebas y depuración sencillas: la capacidad de ejecutar scripts interactivos facilita la detección y corrección de errores en tiempo real, lo que acelera el proceso de desarrollo y depuración.
- Facilidad de integración con IoT: el ecosistema de MicroPython incluye bibliotecas que permiten integrar fácilmente protocolos de comunicación como ESP-NOW y MQTT, esenciales para la transmisión de datos desde los sensores al gateway y de este al servidor IoT.
- Soporte y comunidad activa: cuenta con una amplia comunidad y documentación [12].

## 2.4. Protocolos de comunicación

### 2.4.1. Protocolo ESP-NOW

ESP-NOW es un protocolo de comunicación inalámbrica desarrollado por Espressif para sus dispositivos. A diferencia de los protocolos convencionales que operan en varias capas del modelo OSI, ESP-NOW se basa exclusivamente en la capa de enlace de datos (capa 2), lo que simplifica la comunicación reduciendo las cinco capas del modelo OSI a una sola, esto se puede observar en la figura 2.7. Esta arquitectura optimizada le permite ser extremadamente eficiente en términos de

recursos, ocupando menos CPU y memoria flash en los dispositivos, lo cual es crucial para aplicaciones IoT con restricciones de energía y recursos [13].

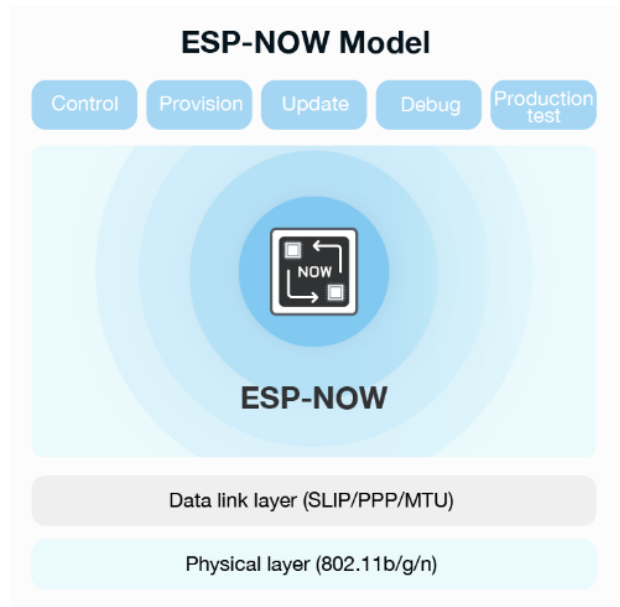


FIGURA 2.7. Modelo ESP-NOW.

ESP-NOW permite la transmisión directa de datos entre dispositivos sin necesidad de una red Wi-Fi o internet. Además, puede funcionar junto con Wi-Fi y Bluetooth LE, ofreciendo flexibilidad para integrarse en sistemas híbridos.

El protocolo admite transmisión unicast y broadcast, lo que facilita la comunicación eficiente entre múltiples dispositivos en redes distribuidas. También optimiza el consumo energético, permitiendo a los dispositivos operar en modo de baja potencia, esencial en nodos sensores que operan con baterías y donde la optimización de consumo es crítica.

Por último, ESP-NOW soporta encriptación, que garantiza la seguridad en la transmisión de datos entre los nodos.

#### 2.4.2. Protocolo MQTT

### 2.5. Aplicación web progresiva

### 2.6. Servidor de internet de las cosas





## **Capítulo 3**

# **Diseño e implementación**

- 3.1. Arquitectura del sistema**
- 3.2. Desarrollo del firmware**
- 3.3. Desarrollo de la aplicación web progresiva**
- 3.4. Implementación del servidor IoT**
- 3.5. Despliegue del sistema**



## Capítulo 4

# Ensayos y resultados

La idea de esta sección es explicar cómo se hicieron los ensayos, qué resultados se obtuvieron y analizarlos.

- 4.1. Banco de pruebas**
- 4.2. Prueba de componentes**
- 4.3. Pruebas sobre el firmware**
- 4.4. Pruebas sobre la aplicación web progresiva**
- 4.5. Pruebas sobre el servidor OpenRemote**



## Capítulo 5

# Conclusiones

### 5.1. Conclusiones generales

La idea de esta sección es resaltar cuáles son los principales aportes del trabajo realizado y cómo se podría continuar. Debe ser especialmente breve y concisa. Es buena idea usar un listado para enumerar los logros obtenidos.

Algunas preguntas que pueden servir para completar este capítulo:

- ¿Cuál es el grado de cumplimiento de los requerimientos?
- ¿Cuán fielmente se pudo seguir la planificación original (cronograma incluido)?
- ¿Se manifestó algunos de los riesgos identificados en la planificación? ¿Fue efectivo el plan de mitigación? ¿Se debió aplicar alguna otra acción no contemplada previamente?
- Si se debieron hacer modificaciones a lo planificado ¿Cuáles fueron las causas y los efectos?
- ¿Qué técnicas resultaron útiles para el desarrollo del proyecto y cuáles no tanto?

### 5.2. Próximos pasos

Acá se indica cómo se podría continuar el trabajo más adelante.



# Bibliografía

- [1] *Growcast*. URL: <https://www.growcast.io/>.
- [2] *Pulsegrow*. URL: <https://pulsegrow.com/>.
- [3] *Trolmaster*. URL: <https://www.trolmaster.com/>.
- [4] Espressif. *ESP32-C3*. URL: <https://www.espressif.com/en/products/socs/esp32-c3>.
- [5] Espressif. *Docs ESP32-C3*. URL: <https://docs.espressif.com/projects/esp-idf/en/stable/esp32c3/get-started/index.html>.
- [6] Texas Instruments. *LM35 Precision Centigrade Temperature Sensors*. SNIS159H –AUGUST 1999–REVISED DECEMBER 2017. URL: <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/lm35.pdf>.
- [7] Measurement Specialties. *HTU21D(F) Sensor*. October 2013. URL: [https://cdn-shop.adafruit.com/datasheets/1899\\_HTU21D.pdf](https://cdn-shop.adafruit.com/datasheets/1899_HTU21D.pdf).
- [8] BOSCH. *BME280*. February 2024. URL: <https://www.bosch-sensortec.com/media/boschsensortec/downloads/datasheets/bst-bme280-ds002.pdf>.
- [9] Ltd Zhengzhou Winsen Electronics Technology Co. *Intelligent Infrared CO2 Module (Model: MH-Z19)*. Valid from: 2015.03.03. URL: <https://www.winsen-sensor.com/d/files/PDF/Infrared%20Gas%20Sensor/NDIR%20CO2%20SENSOR/MH-Z19%20CO2%20Ver1.0.pdf>.
- [10] MicroPython. *MicroPython*. URL: <https://micropython.org/>.
- [11] CTA Electronics. *¿Qué es el MicroPython? Una introducción a Python-3 simplificado para microcontroladores*. URL: <https://www.ctaelectronics.com/es/micropython/>.
- [12] MicroPython. *Docs MicroPython*. URL: <https://docs.micropython.org/en/latest/>.
- [13] Espressif. *ESP-NOW*. URL: <https://www.espressif.com/en/solutions/low-power-solutions/esp-now>.