



MÁSTER UNIVERSITARIO EN INGENIERÍA INDUSTRIAL

TRABAJO FIN DE MÁSTER PRODUCCIÓN AUTOMATIZADA DE ALIMENTOS EN ESPACIOS REDUCIDOS

Autor: Pedro Ballesteros Ranz

Director: Pablo Magliarella

Madrid

Julio de 2026

Declaración de originalidad

Declaro bajo mi responsabilidad que el Proyecto presentado con el título Producción Automatizada de Alimentos en Espacios Reducidos en la ETS de Ingeniería – ICAI de la Universidad Pontificia Comillas en el curso académico 2025/2026 Máster Universitario en Ingeniería Industriales es de mi autoría y no ha sido presentado con anterioridad a otros efectos. El Proyecto no es plagio de otro, ni total ni parcialmente y la información que ha sido tomada de otros documentos está debidamente referenciada.

Uso de Inteligencia Artificial¹

Declaro bajo mi responsabilidad que (indicar la opción correcta):

☐ No he utilizado Inteligencia Artificial en la elaboración del presente documento.

☒ He utilizado Inteligencia Artificial en la elaboración del presente documento y/o del Anexo B siempre en las condiciones permitidas por la Universidad Pontificia Comillas, es decir, aplicando el Nivel 2 de la [Escala de Evaluación de Perkins et al. \(2024\)](#): *“La IA puede utilizarse para actividades previas a la tarea, como la lluvia de ideas, la descripción y la investigación inicial. Este nivel se centra en el uso de la IA para la planificación, las síntesis y la generación de ideas, pero las evaluaciones deben hacer hincapié en la capacidad de desarrollar y refinar estas ideas de forma independiente”*. En concreto, las Inteligencia Artificial ha sido empleada para:

-Elaboración de ideas iniciales para aplicar al proyecto siempre supervisando, contrastando y corrigiendo, aplicando criterio.

-Esquemas o diagramas para elaborar información visual con información contrastada.



Firmado (alumno): Pedro Ballesteros Ranz

Fecha:07/07/2026

Autorización para la entrega del Proyecto

El Director del Proyecto	El co-Director del Proyecto (si aplica)
	
Fdo: Pablo Magliera	Fdo:
Fecha:07/07/2026	Fecha:

¹ Esta declaración se refiere al uso de la Inteligencia Artificial generativa para realizar los documentos del Proyecto (Anexo B y Memoria). No aplica a Proyectos donde, por su naturaleza, deban emplear inteligencia artificial como parte de los mismos (aplicación de técnicas de aprendizaje automático, redes neuronales, análisis de datos...)



MÁSTER UNIVERSITARIO EN INGENIERÍA INDUSTRIAL

TRABAJO FIN DE MÁSTER PRODUCCIÓN AUTOMATIZADA DE ALIMENTOS EN ESPACIOS REDUCIDOS

Autor: Pedro Ballesteros Ranz

Director: Pablo Magliarella

Madrid

Julio de 2026

PRODUCCIÓN AUTOMATIZADA DE ALIMENTOS EN ESPACIOS REDUCIDOS

Autor: Ballesteros Ranz, Pedro Jose.

Director: Magliarella, Pablo.

Entidad Colaboradora: ICAI

RESUMEN DEL PROYECTO

Este trabajo desarrolla y valida en simulación una torre de cultivo hidropónico vertical de bajo coste para viviendas urbanas, gobernada por un microcontrolador ESP32. El sistema mide en continuo variables de cultivo como la temperatura, humedad, pH, conductividad, nivel de agua y calidad del aire, gestiona el riego con una lógica de control por umbrales y publica el estado por MQTT en un panel web. El prototipo ronda los 115-144 euros de coste, con un gasto de funcionamiento reducido.

Palabras clave: Hidroponía, IoT, ESP32, MQTT, cultivo vertical, agricultura urbana.

1. Introducción

El aumento de la población y la pérdida de suelo agrícola por la urbanización, la degradación y el cambio climático obligan a buscar formas de producir alimentos que dependan menos de la tierra. La hidroponía, el cultivo sin suelo mediante una solución de agua y nutrientes, encaja bien en ese escenario porque recircula el agua y llega a reducir su consumo hasta en un 95 % respecto al cultivo tradicional.[1] Si además se lleva a la propia vivienda, la producción se acerca al consumidor y se recorta el transporte.[2] Con esa idea de partida, el trabajo plantea una torre de cultivo pensada para balcones, terrazas o interiores, que pueda funcionar sin que el usuario tenga conocimientos agrícolas.

2. Definición del proyecto

El objetivo es diseñar un sistema de cultivo automatizado, modular y de bajo consumo que una persona sin experiencia pueda manejar en casa. Para conseguirlo se combinan hidroponía e IoT: varios sensores vigilan el estado del cultivo y de la solución nutritiva, un microcontrolador decide cuándo regar y avisa de cualquier desviación, y una interfaz web permite consultarlo todo a distancia. El alcance va desde el diseño de la estructura y la selección de componentes hasta la programación de la lógica de control y el análisis de viabilidad técnica y económica. Como construir un prototipo físico excedía el tiempo disponible, el sistema se ha validado en un entorno de simulación.

3. Descripción del sistema

La solución es una torre vertical recirculante donde en la base hay un depósito con la solución nutritiva; una bomba sumergible la sube hasta lo alto de la torre y, desde ahí, el agua baja por gravedad atravesando los módulos de cultivo, donde se alojan las lechugas. Cada módulo es una pieza repetible, así que se pueden apilar más o menos según el espacio y la producción que se busque. El control descansa en un ESP32, elegido porque reúne procesamiento, conectividad Wi-Fi y bajo coste en una sola placa. El firmware se

reparte en cuatro bloques (adquisición, decisión, actuación y monitorización remota por MQTT [3] [4]) y su comportamiento se describe con una máquina de siete estados que gobierna los ciclos de riego y las alertas. La regla que ordena todo el diseño es simple: ante cualquier fallo o falta de agua, la bomba se apaga.

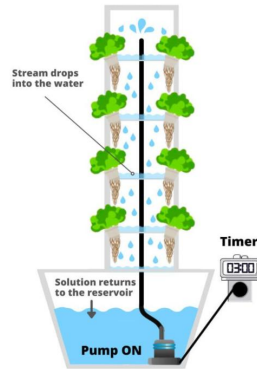


Figura 1 Torre de cultivo hidropónico vertical [5]

4. Resultados

La simulación se ha ejecutado en Wokwi integrado con PlatformIO sobre un ESP32 virtual con todos sus sensores y actuadores. Se han comprobado los siete estados de la máquina y sus transiciones, y el ciclo de riego alterna de forma estable durante media hora de ejecución continua sin bloqueos. Las cuatro alertas críticas (nivel de agua bajo, temperatura fuera de rango, pH excesivo y conductividad alta) saltan cuando corresponde y bloquean la bomba, que solo vuelve a arrancar cuando las condiciones son seguras. En cuanto al coste, el prototipo se sitúa entre 115 y 144 euros según el número de módulos, con un consumo medio en torno a 3,25 W que supone un gasto eléctrico inferior a 0,40 euros al mes. Al llenar la torre, el coste por kilo de lechuga baja hasta unos 3,5 €/kg, por debajo del precio de mercado.

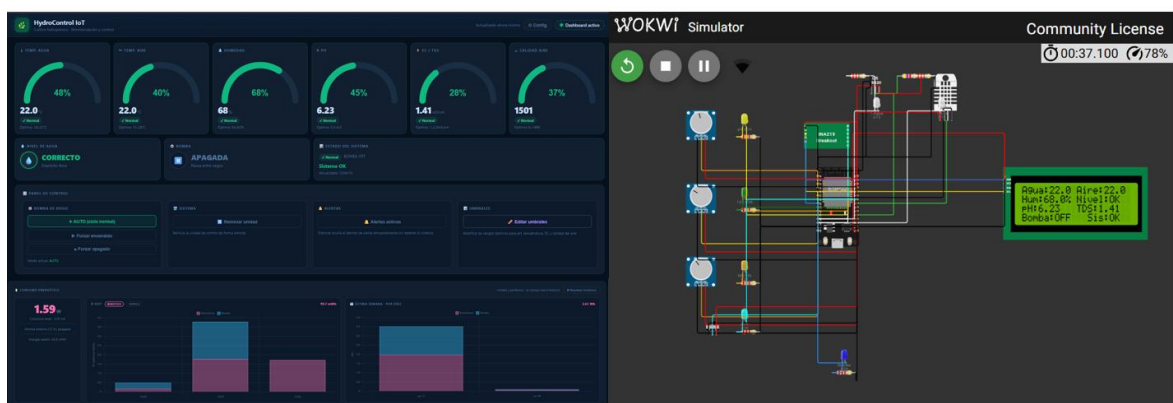


Figura 1. Simulación realizada con la interfaz web

5. Conclusiones

El trabajo confirma que se puede construir un sistema de cultivo hidropónico doméstico funcional y barato apoyado en tecnología IoT abierta. Validarlo en simulación ha permitido depurar la lógica de control sin gastar en hardware ni arriesgar componentes, y deja bien delimitado lo que queda por hacer: fabricar el prototipo físico, calibrar los sensores reales y cerrar el lazo de control con dosificación automática de nutrientes. El estudio de escalabilidad apunta, además, a que un rediseño basado en módulos NFT repetibles abre un camino razonable hacia una explotación mayor, si bien su rentabilidad dependerá sobre todo de la mano de obra y de automatizar tareas como el trasplante y la cosecha.

6. Referencias

- [1] I. Baras y D. Dávila, “A review of hydroponics and conventional agriculture based on sustainability,” *Energies*, vol. 16, n.º 4, art. 1690, 2023.
- [2] F. Orsini et al., “How much food can we grow in urban areas? A global meta-analysis,” *Environmental Research Letters*, 2022.
- [3] A. S. Tanenbaum y D. Wetherall, *Computer Networks*, 5.ª ed. Upper Saddle River, NJ: Pearson Prentice Hall.
- [4] OASIS, MQTT Version 5.0. OASIS Standard, 2019.
- [5] GroHo, «Elegir sistemas hidropónicos,» [En línea]. Available: <https://www.groho.es/post/elegir-sistemas-hidroponicos>.

AUTOMATED FOOD PRODUCTION IN CONFINED SPACES

Author: Ballesteros Ranz, Pedro Jose.

Supervisor: Magliarella, Pablo.

Collaborating Entity: ICAI

ABSTRACT

This project develops and validates in simulation a low-cost vertical hydroponic growing tower for urban homes, controlled by an ESP32 microcontroller. The system continuously measures the crop variables like temperature, humidity, pH, conductivity, water level and air quality, manages irrigation with threshold-based control logic and publishes its status over MQTT to a web dashboard. The prototype costs around 115-144 euros, with a low running cost.

Keywords: Hydroponics, IoT, ESP32, MQTT, vertical farming, urban agriculture.

1. Introduction

Population growth and the loss of farmland to urban sprawl, soil degradation and climate change are pushing us to find ways of producing food that relies less on land. Hydroponics, that is growing without soil using a solution of water and nutrients, fits this scenario well because it recirculates the water and can cut its use by up to 95 % compared with conventional farming [1]. Bringing it into the home also moves production closer to the consumer and shortens transport [2]. Starting from that idea, this work proposes a growing tower meant for balconies, terraces or indoor spaces that can run without the user having any farming knowledge.

2. Project definition

The aim is to design an automated, modular, low-power growing system that someone with no experience can run at home. To do so, hydroponics and IoT are combined: several sensors watch the state of the crop and the nutrient solution, a microcontroller decides when to irrigate and warns of any deviation, and a web interface lets the user check everything remotely. The scope runs from structural design and the choice of components to the programming of the control logic and the analysis of technical and economic feasibility. As building a physical prototype was beyond the time available, the system was validated in a simulation environment.

3. System description

The solution is a recirculating vertical tower where a reservoir at the base holds the nutrient solution; a submersible pump lifts it to the top of the tower and, from there, the water flows down by gravity through the growing modules, where the lettuce sits. Each module is a repeatable part, so more or fewer can be stacked depending on the space and the output wanted. Control relies on an ESP32, chosen because it brings processing, Wi-Fi connectivity and low cost together on a single board. The firmware is split into four blocks (acquisition, decision, actuation and remote monitoring over MQTT [3] [4]) and its behavior is described by a seven-state machine that governs the irrigation cycles and

the alerts. The rule behind the whole design is simple: on any fault or lack of water, the pump switches off.

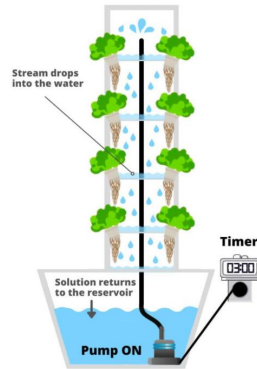


Figure 1. Vertical hydroponic growing tower [5]

4. Results

The simulation was run in Wokwi integrated with PlatformIO on a virtual ESP32 with all its sensors and actuators. The seven states of the machine and their transitions were checked, and the irrigation cycle alternated steadily over half an hour of continuous running without locking up. The four critical alerts (low water level, temperature out of range, excessive pH and high conductivity) fire when they should and block the pump, which only restarts once conditions are safe again. On cost, the prototype ranges from 115 to 144 euros depending on the number of modules, with an average draw of about 3.25 W, which means an electricity cost below 0.40 euros a month. Filling the tower brings the cost per kilo of lettuce down to around 3.5 €/kg, below the market price.



Figure 2. Simulation performed using the web interface

5. Conclusions

The work confirms that a functional, cheap home hydroponic system can be built on open IoT technology. Validating it in simulation made it possible to debug the control logic without spending on hardware or risking components, and it clearly sets out what is left to do: building the physical prototype, calibrating the real sensors and closing the control loop with automatic nutrient dosing. The scalability study also points to a redesign around repeatable NFT modules as a reasonable path towards a larger operation,

although its profitability will depend above all on labour and on automating tasks such as transplanting and harvesting.

6. References

- [1] I. Baras and D. Dávila, “A review of hydroponics and conventional agriculture based on sustainability,” *Energies*, vol. 16, no. 4, art. 1690, 2023.
- [2] F. Orsini et al., “How much food can we grow in urban areas? A global meta-analysis,” *Environmental Research Letters*, 2022.
- [3] A. S. Tanenbaum and D. Wetherall, *Computer Networks*, 5th ed. Upper Saddle River, NJ: Pearson Prentice Hall.
- [4] OASIS, *MQTT Version 5.0. OASIS Standard*, 2019.
- [5] GroHo, «Elegir sistemas hidropónicos,» [Online]. Available: <https://www.groho.es/post/elegir-sistemas-hidroponicos>.

Índice de la memoria

Capítulo 1. Introducción	7
Capítulo 2. Descripción de las Tecnologías.....	9
2.1 IoT (Internet of things).....	9
2.1.1 Hardware.....	9
2.1.2 Comunicaciones IoT.....	11
2.2 Hidroponía.....	16
2.3 PlatformIO.....	18
2.4 Wokwi.....	18
Capítulo 3. Estado de la Cuestión	20
3.1 Uso doméstico.....	20
3.2 Uso industrial.....	22
Capítulo 4. Definición del Trabajo	23
4.1 Justificación.....	23
4.2 Objetivos	24
4.3 Metodología.....	24
4.4 Planificación y Estimación Económica.....	26
Capítulo 5. Sistema Desarrollado.....	30
5.1 Diseño Conceptual	30
5.2 Cultivo de lechugas	32
5.3 Diseño estructura.....	33
5.4 Diseño Control.....	34
5.4.1 Arquitectura de control	34
5.4.2 Lógica de control del sistema.....	36
5.4.3 Estrategia de monitorización y actuación	37
5.4.4 Arquitectura software e implementación	38
5.4.5 Flujo de datos y tareas del sistema.....	40
5.4.6 Máquina de estados	42
5.4.7 Lógica de alertas y umbrales	44

5.4.8 Validación de medidas	45
5.4.9 Dashboard de monitorización remota.....	46
5.5 Elementos de control	47
5.5.1 Microcontrolador	47
5.5.2 Sensores	48
5.5.3 Actuadores	56
Capítulo 6. Análisis de Resultados.....	59
6.1 Resultados de la Simulación.....	59
6.1.1 Validación de la lógica de control y la máquina de estados	59
6.1.2 Métricas de rendimiento y consumo del sistema	60
6.1.3 Limitaciones Simulación frente al prototipo físico	62
6.2 Consumo Energético.....	63
6.3 Autonomía Potencial	65
6.4 Evaluación Técnica y Económica	66
6.4.1 Análisis de costes	66
6.4.2 Estimación de rendimiento	70
6.4.3 Estudio de escalabilidad industrial.....	72
Capítulo 7. Conclusiones y Trabajos Futuros.....	79
7.1 Trabajos futuros	80
7.1.1 Desarrollo de un prototipo físico funcional.....	80
7.1.2 Incorporación de actuadores para cerrar el lazo de control.....	81
7.1.3 Evolución hacia un prototipo industrial.....	81
7.1.4 Escalado de la arquitectura IoT.....	82
7.1.5 Optimización energética y autonomía.....	82
7.1.6 Monitorización inteligente con visión computacional y aprendizaje automático	83
7.1.7 Mejoras Interfaz de usuario	83
Capítulo 8. Bibliografía.....	85
ANEXO I-ODS.....	91
ANEXO II-Estructura [17].....	93
ANEXO III-Asignación Microcontrolador.....	96

Sensores	96
Actuadores y visualización.....	97
LEDs	97
Alimentación	98
<i>ANEXO IV- Capturas Simulación.....</i>	<i>99</i>

Índice de figuras

Figura 1. Estructura IoT.....	9
Figura 2. Modelo OSI [3]	12
Figura 3. Modelo TCP/IP [3].....	13
Figura 4. Tipos de sistemas hidropónicos [6].....	17
Figura 5. Kit principiante hidroponía [10].....	21
Figura 6. Ejemplos soluciones hidropónicas verticales [11] [12] [13].....	21
Figura 7. Granja Vertical 80 Acres Farms.....	22
Figura 8. Sistema torre vertical [14].....	30
Figura 9. Ejemplo de la solución base [17]	33
Figura 10. Flujo de datos y ciclo de control del sistema	41
Figura 11. Máquina de estados del sistema de control	44
Figura 12. Sensor DS18B20 [18]	49
Figura 13. Conexión DS18B20con la placa [18].....	49
Figura 14. Sensor DHT11 sin PCB (izq) y con PCB (der) [19]	50
Figura 15. Conexión DHT11 sin PCB a la placa [19].....	50
Figura 16. Sensor PH-4502 [20].....	51
Figura 17. Conexión PH-4502 a la placa [20].....	51
Figura 18. Sensor TDS Meter [21]	52
Figura 19. Conexión TDS Meter a la placa [22]	52
Figura 20. Sensor MQ135 [23].....	53
Figura 21. Conexión Sensor MQ135 [24]	53
Figura 22. Sensor agua [25].....	54
Figura 23. Conexión sensor agua [26].....	54
Figura 24. Esquema con medidor de consumo [27]	55
Figura 25. Sensor consumo INA219 [27].....	55
Figura 26. Conexionado INAC219.....	56
Figura 27. Bomba 5V [28].....	57
Figura 28. Módulo almacenamiento cultivo.....	93

Figura 29. Depósito de agua.....	94
Figura 30. Tapa final de la torre	94
Figura 31. Tapa depósito y unión módulo.....	95
Figura 32. Estado normal bomba apagada.....	99
Figura 33. Estado normal bomba encendida	99
Figura 34. Estado Ph fuera de rango.....	99
Figura 35. Estado TDS fuera de rango	100
Figura 36. Estado calidad aire fuera de rango	100
Figura 37. Estado nivel agua fuera de rango	100
Figura 38. Estado Temperatura muy alta.....	101
Figura 39. Interfaz consumo energético	101
Figura 40. Interfaz cambio de variables ejemplo 1	101
Figura 41. Interfaz cambio de variables ejemplo 2	102

Índice de tablas

Tabla 1. Estimación del coste del prototipo	28
Tabla 2. Estimación del coste mensual del prototipo	28
Tabla 3. Parámetros cultivo lechuga [15].....	32
Tabla 4. Sustrato y mezcla [15].....	33
Tabla 5. Casos de prueba validados en la simulación Wokwi.....	60
Tabla 6. Métricas muestreo y temporización.....	61
Tabla 7. Umbrales de alerta crítica de los sensores	61
Tabla 8. Métricas consumo.....	62
Tabla 9. Consumo Energético del sistema.....	64
Tabla 10. Posibles soluciones de autonomía	66
Tabla 11. Desglose de costes reales de los componentes electrónica+ hidráulica	68
Tabla 12. Coste de material de la estructura por pieza por impresión PETG.....	69
Tabla 13. Coste de filamento de la estructura según configuración	69
Tabla 14. Coste de operación mensual del prototipo de tres módulos	70
Tabla 15. Producción y rendimiento según el número de plantas	71
Tabla 16. Coste por unidad producida (€/kg) según configuración	71
Tabla 17. Parámetros modulo industrial.....	73
Tabla 18. Escenarios de Producción y número de módulos necesarios	73
Tabla 19. Componentes del Módulo.....	74
Tabla 20. Componentes núcleo compartido columna	75
Tabla 21. Estimación del ROI en diferentes escenarios de producción	76
Tabla 22. Conexión de Sensores.....	96
Tabla 23. Conexión de Actuadores y LCD.....	97
Tabla 24. Conexión de Leds.....	98

Capítulo 1. INTRODUCCIÓN

La población mundial crece a buen ritmo mientras el suelo cultivable escasea cada vez más. La agricultura ocupa alrededor del 11 % de la superficie terrestre, unos 1.500 millones de hectáreas, y esa cifra tiende a reducirse por la degradación del terreno, la expansión urbana y el cambio climático. [1] La demanda de comida tendrá un crecimiento de un 50% para 2030. [1] Con esta situación, cultivar en entornos urbanos, donde el suelo es el principal limitante, obliga a buscar alternativas más sostenibles.

La agricultura tradicional utiliza una gran cantidad de pesticidas, herbicidas, fertilizantes y medicamentos químicos, que contaminan el suelo y causan graves riesgos para la salud humana y el medio ambiente. [1] La hidroponía ahorra hasta un 95% de agua en comparación con la agricultura tradicional [1], al permitir recircular el agua y los nutrientes. Un estudio sobre el rendimiento de lechuga que comparó la hidroponía con la agricultura convencional mostró que las demandas de agua fueron de $20 \pm 3,8$ L/kg/año y 250 ± 25 L/kg/año, respectivamente, para este cultivo. [1] Esto permite que se pueda considerar la hidroponía como método de autoconsumo ya que el gasto de recursos y suelo en entornos urbanos está limitado.

La agricultura urbana permite acercar la producción al consumidor final, reduciendo la huella de carbono que se genera en el transporte en la agricultura tradicional, además de garantizar alimentos más frescos. Según un análisis [2], se proporciona una evidencia más sólida y relevante sobre la productividad de la agricultura urbana a nivel mundial demostrando tener potencial de autosuficiencia de satisfacer la demanda local de alimentos en las ciudades y pueblos.

Este proyecto propone diseñar y prototipar un sistema automatizado para cultivar alimentos en espacios pequeños: balcones, terrazas, patios o interiores de viviendas urbanas. Se apoya en la hidroponía (cultivo sin tierra) y en sensores conectados por IoT que vigilan las variables que de verdad condicionan el cultivo: la temperatura del aire y del agua, la humedad, el pH,

la conductividad de la solución nutritiva y el nivel del depósito. Así, una persona sin experiencia agrícola puede obtener cosecha fresca con poco esfuerzo. El sistema se plantea modular, de bajo consumo y capaz de ajustarse a viviendas con limitaciones de espacio y tiempo.

Capítulo 2. DESCRIPCIÓN DE LAS TECNOLOGÍAS

2.1 *IoT (INTERNET OF THINGS)*

El internet de las cosas (IoT) es la arquitectura que conecta dispositivos físicos con plataformas digitales compartiendo información y datos. A través de esta comunicación se pueden automatizar tareas de una manera más inteligente y rápida. Para este proyecto se hará la siguiente estructura:

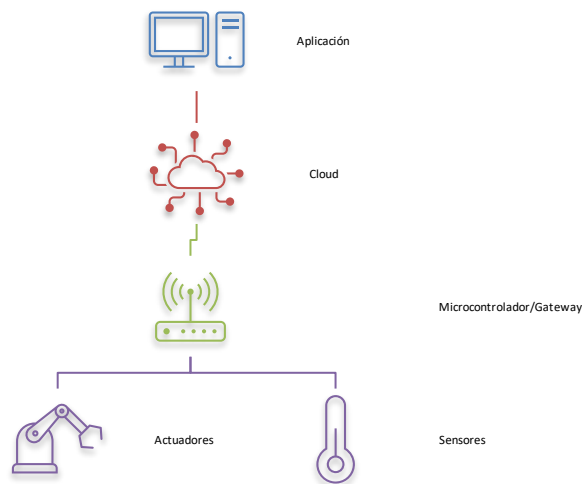


Figura 1. Estructura IoT

Los sensores y actuadores se conectarán a un Microcontrolador/Gateway, encargado de enviar los datos recibidos vía Wi-Fi o Bluetooth a una plataforma en la nube para su almacenamiento. Esta información será visualizada a través de una interfaz de usuario, implementada como la aplicación desarrollada para el sistema.

2.1.1 HARDWARE

El objetivo principal de IoT es monitorizar y controlar procesos en un sistema, lo cual necesita dispositivos con capacidades de computación y comunicación. A la hora de elegir un dispositivo hay que tener en cuenta estos criterios:

- **Computación y almacenamiento:** Frecuencia del reloj, número de núcleos, memoria RAM y memoria ROM.
- **Consumo energético:** Crítico para la autonomía del dispositivo, especialmente si funciona con baterías o requiere "energy harvesting" (recolección de energía). El uso de modos de suspensión es vital cuando los dispositivos operan durante largos periodos o no se les puede cambiar la batería.
- **Coste:** Determina la viabilidad del proyecto cuando se requiere el despliegue de un gran número de dispositivos.
- **Requisitos adicionales:** Modularidad de la plataforma, adopción de estándares abiertos (hardware y software open-source) y soporte por parte de la comunidad.

Atendiendo a estos requerimientos, el ecosistema actual de plataformas de hardware para IoT se puede clasificar en cuatro grandes categorías:

- **Microcontroladores.** Esta categoría está liderada por plataformas como Arduino (ej. Arduino UNO, Arduino DUE o Arduino MKR). Consisten en placas electrónicas equipadas con un microcontrolador diseñado para ejecutar un único programa (conocido como sketch) de forma cíclica y continua. Destacan por ser hardware y software de código abierto, tener un coste reducido y ofrecer un entorno de desarrollo intuitivo basado en C++. Al carecer de un sistema operativo complejo, son dispositivos óptimos para actuar como nodos finales que requieren funcionar con un consumo energético mínimo. Pueden operar en modos de bajo consumo (Sleep Mode) durante largos periodos de tiempo, lo que los hace ideales para despliegues alimentados por baterías en entornos aislados. La familia Arduino dispone de modelos de entrada para tareas básicas, modelos orientados a IoT con conectividad específica (como el MKR 1500 NB-IoT) y modelos avanzados para aplicaciones de inteligencia artificial en el borde (Edge AI).
- **Microcontroladores con conectividad integrada.** Para solventar las necesidades directas de comunicación inalámbrica en nodos de bajo coste, destacan los sistemas en chip (SoC) desarrollados por Espressif, como el ESP8266, ESP8285 y el ESP32. Estos microcontroladores integran de manera nativa conectividad Wi-Fi y, en el caso

del ESP32, también Bluetooth. Gracias a su reducidísimo coste y alta integración, son ampliamente utilizados en el desarrollo de dispositivos comerciales para el hogar inteligente (domótica), como los enchufes e interruptores inteligentes.

- **Ordenador monoplaca (SBC).** El estándar de facto en esta categoría es la Raspberry Pi, concebida originalmente con fines educativos, pero ampliamente adoptada en el ámbito industrial y maker. A diferencia de los microcontroladores, una Raspberry Pi es un ordenador de propósito general en miniatura. Posee un procesador ARM de alto rendimiento y ejecuta un sistema operativo completo (habitualmente distribuciones de Linux como Raspbian/Raspberry Pi OS, aunque soporta otros como Windows 10 IoT). Esto le permite ejecutar múltiples programas y procesos de forma simultánea. Su abanico de modelos permite ajustar el presupuesto, oscilando desde modelos básicos como la Raspberry Pi Zero (aproximadamente 5 euros) hasta equipos muy potentes como la RaspberryPi5 (120 euros).
- **Aceleradores de Inteligencia Artificial (TPU/GPU)** Con el auge del procesamiento de datos en el extremo de la red (Edge Computing), han surgido plataformas de hardware especializadas en manejar cargas de trabajo intensivas en Inteligencia Artificial y Visión Computacional. Destacan en este nicho la NVIDIA Jetson Nano y la Google Coral Dev Board. Incorporan coprocesadores específicos (GPU acelerada en el caso de Nvidia y TPU perimetral en el caso de Google) que permiten realizar operaciones de Machine Learning a alta velocidad. Esta capacidad de procesamiento superior conlleva también un mayor consumo energético (entre 2W y 10W dependiendo de la carga) y un mayor coste económico en comparación con las arquitecturas mencionadas anteriormente. Sus usos principales son en sistemas de vigilancia inteligente, monitorización de tráfico en tiempo real o cualquier caso de uso en Smart Cities que requiera un procesamiento visual complejo localmente sin depender de la nube.

2.1.2 COMUNICACIONES IOT

Las comunicaciones constituyen uno de los pilares fundamentales de cualquier arquitectura IoT. El problema central de la comunicación, tal y como enunció Claude Shannon en 1948

[3], consiste en reproducir en un punto un mensaje generado en otro. Para abordar este problema de forma estructurada se emplea el modelo de capas, basado en el principio de dividir el problema global en subproblemas bien definidos, cada uno resuelto por una capa independiente que ofrece servicios a la capa superior y consume los servicios de la capa inferior.

El modelo de referencia más extendido es el modelo OSI (Open Systems Interconnection), definido por la ISO, que organiza las funciones de comunicación en siete capas: física, enlace de datos, red, transporte, sesión, presentación y aplicación. En la práctica, el ecosistema de Internet consolida estas capas en el modelo TCP/IP, que agrupa las capas inferiores en una única capa de acceso a la red y elimina las capas de sesión y presentación, resultando en cuatro capas funcionales: acceso a la red, red, transporte y aplicación. Cada capa utiliza un esquema de direccionamiento propio: las capas de enlace identifican interfaces mediante direcciones MAC, la capa de red utiliza direcciones IP, la capa de transporte distingue aplicaciones mediante números de puerto y la capa de aplicación emplea URLs y nombres de dominio. [3]

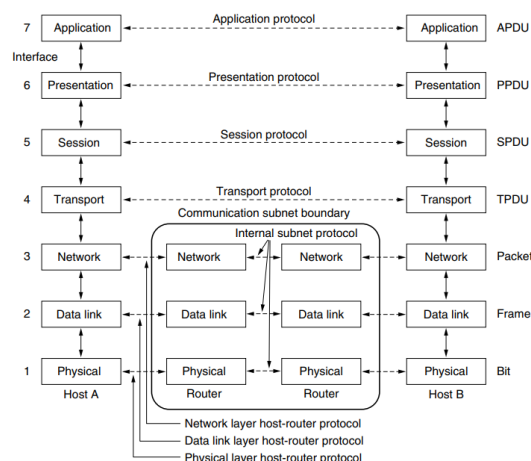


Figura 2. Modelo OSI [3]

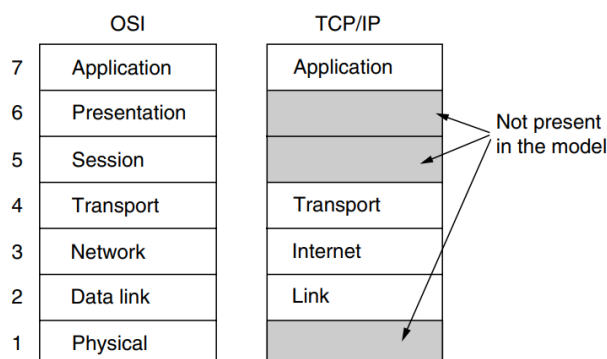


Figura 3. Modelo TCP/IP [3]

En el contexto IoT, las capas físicas y de enlace las ocupan tecnologías de acceso inalámbrico como Wi-Fi, Bluetooth, Zigbee o LoRaWAN, que definen el medio de transmisión y el control de acceso al canal. Sobre ellas operan IP en la capa de red y TCP o UDP en la capa de transporte. Finalmente, la capa de aplicación la cubren protocolos como MQTT, HTTP/REST o CoAP. En los subapartados siguientes se analizan las alternativas en la capa de transporte y en la capa de aplicación, que son los niveles más relevantes para la implementación de este proyecto.

2.1.2.1 Capa de Transporte

La capa de transporte se sitúa entre la capa de red y la capa de aplicación. Su función es segmentar los datos, entregarlos a la aplicación correcta mediante números de puerto y controlar la fiabilidad, el orden y la velocidad de la transmisión según el protocolo empleado. En la mayoría de las arquitecturas IoT sobre IP coexisten dos protocolos de transporte fundamentales:

- **TCP (Transmission Control Protocol).** TCP es un protocolo orientado a conexión que establece un canal virtual entre los dos extremos antes de iniciar la transmisión. Garantiza la entrega de todos los segmentos, preserva el orden de llegada y dispone de mecanismos de control de flujo y congestión. Estas garantías tienen un coste: la cabecera TCP añade entre 20 y 60 bytes de sobrecarga por segmento, la latencia es mayor y no soporta comunicaciones multicast ni broadcast. En IoT, TCP resulta

adecuado cuando la integridad de los datos es crítica, como en el envío de configuraciones, alertas o mensajes de control. [3]

- **UDP (User Datagram Protocol).** UDP es un protocolo sin conexión que envía datagramas de forma independiente sin establecer canal previo ni garantizar entrega, orden ni ausencia de duplicados. Su cabecera es de tan solo 8 bytes, la latencia es mínima y soporta comunicaciones multicast y broadcast. En IoT, UDP resulta preferible cuando la velocidad y la eficiencia son prioritarias frente a la fiabilidad absoluta, como en la transmisión periódica de lecturas de sensores donde una medida perdida puede reemplazarse por la siguiente. [3]

2.1.2.2 Capa de Aplicación

La capa de aplicación es la más alta del modelo OSI y define el formato, la semántica y el flujo de los mensajes intercambiados entre los dispositivos y la plataforma de gestión. En el ecosistema IoT, los protocolos de aplicación se clasifican en dos grandes paradigmas de comunicación: cliente-servidor y publicación-suscripción. [3] La elección del paradigma tiene implicaciones directas sobre el acoplamiento entre los nodos, la escalabilidad del sistema y la eficiencia en el uso del canal.

Modelo cliente-servidor

En el modelo cliente-servidor, el dispositivo (cliente) inicia explícitamente cada intercambio enviando una petición al servidor, que genera y devuelve la respuesta correspondiente. La comunicación es síncrona y acoplada: ambos extremos deben estar activos durante el intercambio y el cliente queda bloqueado hasta recibir la respuesta. Es el modelo predominante en la web, pero su esquema petición-respuesta resulta menos eficiente en escenarios IoT donde los dispositivos publican datos de forma continua y periódica sin que exista una petición explícita que los desencadene.

- **HTTP/REST.** HTTP opera sobre TCP y es el protocolo dominante en la web. Su modelo petición-respuesta, basado en métodos como GET, POST o PUT, es universal y cuenta con soporte masivo en bibliotecas y plataformas. No obstante, la

sobrecarga de sus cabeceras lo hace poco eficiente para dispositivos embebidos que transmiten datos de sensores con alta frecuencia y ancho de banda limitado. [3]

Modelo publicación-suscripción

En el modelo publicación-suscripción (pub/sub), los dispositivos no se comunican directamente entre sí sino a través de un intermediario central denominado broker. Los publicadores envían mensajes organizados por topics, los suscriptores se registran en los topics de su interés y reciben los mensajes automáticamente cuando el broker los distribuye. El modelo es asíncrono y desacoplado en tres dimensiones: espacio (publicador y suscriptor no necesitan conocerse), tiempo (no deben estar activos simultáneamente) y sincronía (el publicador no espera respuesta). Estas propiedades lo hacen especialmente adecuado para arquitecturas IoT con múltiples dispositivos y consumidores de datos heterogéneos.

- **MQTT (Message Queuing Telemetry Transport).** MQTT es el protocolo pub/sub de referencia en IoT. Diseñado originalmente para telemetría en entornos con ancho de banda reducido, opera sobre TCP con una cabecera fija mínima de 2 bytes. El broker gestiona la distribución de mensajes, las implementaciones más habituales son Mosquitto (local) y servicios en la nube como HiveMQ o AWS IoT Core. Ofrece tres niveles de calidad de servicio: QoS 0 (entrega sin confirmación), QoS 1 (al menos una vez) y QoS 2 (exactamente una vez), permitiendo ajustar el equilibrio entre fiabilidad y eficiencia según el tipo de dato. [4]
- **AMQP (Advanced Message Queuing Protocol).** AMQP es otro protocolo pub/sub orientado a mensajería empresarial que también opera sobre TCP. Ofrece garantías avanzadas de entrega, enrutamiento flexible, soporte de transacciones y confirmaciones a nivel de mensaje. Su mayor robustez conlleva una complejidad y un tamaño de trama superiores a MQTT, lo que lo hace poco adecuado para microcontroladores embebidos como el ESP32. Su ámbito de uso habitual son las integraciones backend y los sistemas de mensajería corporativa. [3]

2.2 HIDROPONÍA

La hidroponía es una forma de cultivo que prescinde del uso del suelo y se basa en la administración de agua con nutrientes para que esta pueda crecer y hacer cultivo. Esta agua se puede recuperar y reciclar, y los nutrientes se pueden obtener de diversas maneras, incluso de excrementos de peces. [5]

Los diferentes tipos de sistemas hidropónicos que existen son los siguientes:

- **Sistema de mecha o pabilo:** Es el más sencillo y no usa bombas de agua. Las plantas absorben la solución nutritiva a través de unas mechas o cordones desde un depósito. Solo sirve para plantas que necesitan poca agua.
- **Técnica de película nutritiva (NFT):** Consiste en bombear la solución nutritiva de forma constante para crear una corriente que baña directamente las raíces (normalmente dentro de tubos de PVC). No suele usar sustrato, pero si falla la bomba, las raíces se secan rápido.
- **De raíz flotante:** Las plantas se colocan sobre una plancha que flota (como unicel) directamente sobre un estanque con solución nutritiva, por lo que las raíces están siempre sumergidas. Se necesita una bomba de aire para oxigenar el agua. Es muy barato y genial para lechugas.
- **Aeroponia:** Las raíces están colgando en el aire dentro de un espacio oscuro y se rocían con una de solución nutritiva en intervalos de pocos minutos. Es muy eficiente, pero súper sensible a cortes de luz porque las raíces se secan rapidísimo sin el rocío.
- **Flujo y reflujo (Ebb & Flow):** Una bomba inunda temporalmente las bandejas donde están las plantas y luego el líquido se drena de vuelta al depósito. Es muy versátil y permite usar diferentes tipos de sustratos.
- **Sistema por goteo:** Un temporizador activa una bomba que hace gotear la solución nutritiva justo en la base de cada planta. Algunos sistemas recuperan el agua que sobra para reutilizarla, y otros simplemente la desechan.

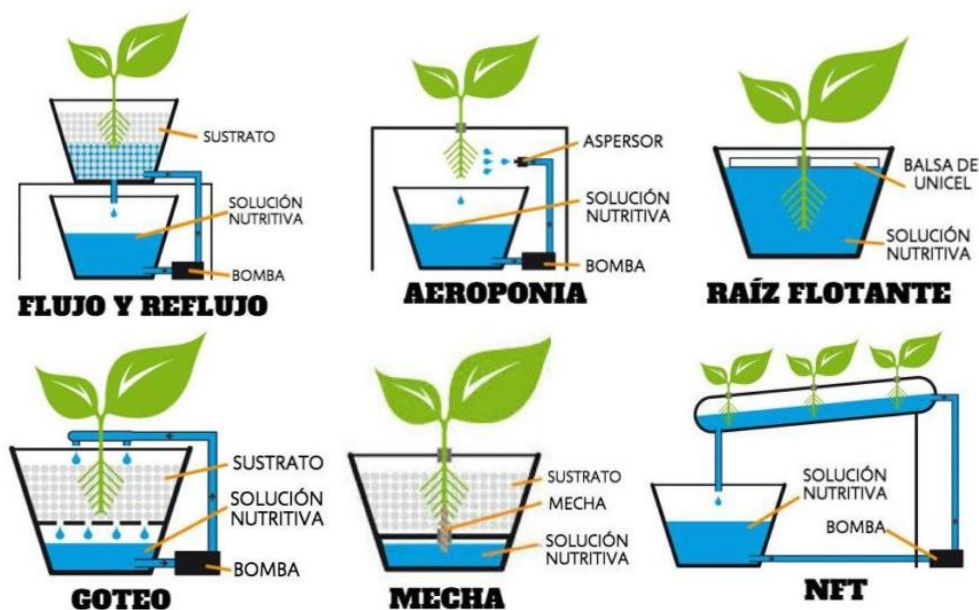


Figura 4. Tipos de sistemas hidropónicos [6]

Los elementos a tener en cuenta para el control de estos cultivos son los siguientes:

- **PH:** Permite determinar el estado de la solución nutritiva que circula por el sistema. Este valor varía según el tipo de cultivo, ya que cada planta posee un nivel óptimo específico. [5]
- **Temperatura:** Es un factor determinante que influye en el desarrollo del cultivo, variando en función de la zona geográfica, la estación del año y las horas del día. [7]
- **Conductividad eléctrica:** Refleja la concentración de nutrientes disueltos en la solución y permite identificar cuándo es necesario reponerlos. [5]
- **Aire:** En entornos cerrados, el aumento controlado de la concentración de CO₂ puede mejorar la productividad y el crecimiento de las plantas. [5]

Los tipos de cultivos pueden ser variados, pero hay algunas más rentables en el cultivo hidropónico [5]:

- **Verduras:** judía verde, coliflor, col, apio, brócoli, lechuga, guisante, puerro, espinaca.
- **Hortalizas:** zanahoria, remolacha, pepino, berenjena, cebolla, pimiento, rábano, calabacín, tomate.
- **Frutas:** melón cantalupo, fresa, frambuesa, arándano, uva e, incluso, frutos de árbol como limón o manzana empleando árboles enanos.
- **Plantas aromáticas:** albahaca, cilantro, menta, tomillo, salvia, estragón, romero.

2.3 PLATFORMIO

PlatformIO es un ecosistema de desarrollo de código abierto orientado a sistemas embebidos e IoT. Su componente principal es PlatformIO IDE, una extensión para Visual Studio Code que integra en un único entorno todas las herramientas necesarias para el desarrollo de firmware: compilador, gestor de librerías, monitor serie y herramienta de carga sobre la placa. Además, dispone de una interfaz de línea de comandos que permite automatizar estas tareas en flujos de integración continua. [8]

Una de sus principales ventajas es la compatibilidad con más de 1 500 placas de desarrollo y múltiples frameworks de programación, entre ellos Arduino y ESP-IDF, lo que lo convierte en una solución especialmente adecuada para trabajar con microcontroladores como el ESP32. A diferencia del IDE oficial de Arduino, PlatformIO gestiona automáticamente las dependencias y versiones de librerías mediante un fichero de configuración de proyecto (platformio.ini), lo que facilita la reproducibilidad del entorno de desarrollo y la colaboración entre equipos. [8]

2.4 WOKWI

Wokwi es un simulador de electrónica en línea, gratuito y de código abierto, diseñado para prototipar y depurar proyectos basados en plataformas como Arduino, ESP32 y Raspberry Pi sin necesidad de disponer del hardware físico. A través de su interfaz web, el usuario

puede diseñar el esquema de conexiones, cargar el código fuente y ejecutar la simulación en tiempo real, observando el comportamiento de los componentes virtuales (sensores, actuadores, pantallas, etc.) tal y como se produciría en el dispositivo real. [9]

Wokwi es compatible con un amplio catálogo de componentes y con la mayoría de librerías del ecosistema Arduino, lo que permite reproducir con fidelidad el entorno de desarrollo real. Su uso resulta especialmente valioso en las fases iniciales del proyecto, cuando se necesita validar la lógica del firmware y la integración de sensores sin incurrir en el riesgo de dañar componentes físicos. En este proyecto se ha utilizado su extensión en Visual Studio Code por la magnitud del proyecto y la integración nativa con PlatformIO, lo que permite simular el firmware directamente desde el mismo entorno de desarrollo sin necesidad de exportar ni adaptar el código a la interfaz web.

Capítulo 3. ESTADO DE LA CUESTIÓN

El uso de técnicas de cultivo sin suelo ha ganado relevancia en los últimos años como una alternativa sostenible y eficiente frente a la agricultura tradicional. Gracias a su versatilidad, la hidroponía se desarrolla tanto en entornos domésticos como en instalaciones industriales, adaptándose a diferentes escalas y objetivos de producción. Su expansión responde a la creciente demanda de soluciones que promuevan la autosuficiencia alimentaria, el aprovechamiento del espacio y la sostenibilidad ambiental en un contexto urbano y global cada vez más exigente.

3.1 USO DOMÉSTICO

El mercado de la producción a pequeña escala de cultivos domésticos ha experimentado un notable crecimiento debido a la amplia variedad de soluciones disponibles. Actualmente, se pueden encontrar desde pequeños huertos de encimera hasta sistemas verticales de gran capacidad. Estas soluciones están diseñadas para todo tipo de usuarios, ofreciendo una experiencia sencilla y accesible, en la que basta con conectar el sistema para comenzar a cultivar sin necesidad de conocimientos previos.

Los kits para principiantes destacan por estar orientados a nuevos usuarios interesados en iniciarse en el cultivo hidropónico o doméstico. Se trata de paquetes “todo en uno” que incluyen los elementos básicos necesarios para comenzar: una estructura de cultivo, un sistema de riego con bomba, un depósito de agua y un kit inicial con semillas y soluciones nutritivas. Generalmente, estos sistemas presentan dimensiones reducidas, similares a un macetero rectangular de unos 30 cm, e incorporan funciones inteligentes como el control mediante dispositivos móviles, sensores ambientales o iluminación LED optimizada para el crecimiento de las plantas. Además, existe una amplia variedad de diseños que difieren en estética, materiales y acabados, adaptándose a distintos entornos domésticos.



Figura 5. Kit principiante hidroponía [10]

Por otro lado, las soluciones de cultivo hidropónico vertical representan una evolución de estos kits básicos, combinando múltiples módulos en una misma estructura. Estos sistemas permiten aprovechar al máximo el espacio disponible mediante configuraciones en torre, armario o jardín vertical, ofreciendo una mayor capacidad de producción en superficies reducidas y consolidándose como una opción eficiente y estética para el cultivo urbano.



Figura 6. Ejemplos soluciones hidropónicas verticales [11] [12] [13]

3.2 USO INDUSTRIAL

La producción de alimentos de forma hidropónica se ha convertido en un sector muy tecnificado. Predomina el uso de granjas verticales e invernaderos inteligentes con el uso de sensores IoT, la automatización de la producción y plataformas en la nube para gestionar todos los aspectos del cultivo. A continuación, se van a mostrar ejemplos reales de empresas que utilizan estas metodologías:

80 Acres Farms es una empresa estadounidense que plantean alzar la tecnología en el sector de la agricultura en comparación con la agricultura tradicional. Sus instalaciones están altamente automatizadas y operan con energía 100% renovable. Tienen una gran variedad de verduras con gran calidad. Utilizan sistemas de visión inteligente para saber el estado del cultivo 24/7. También tienen unos racks en los que se puede tener una granja que se podría poner en cualquier zona geográfica independientemente de los fenómenos climáticos.

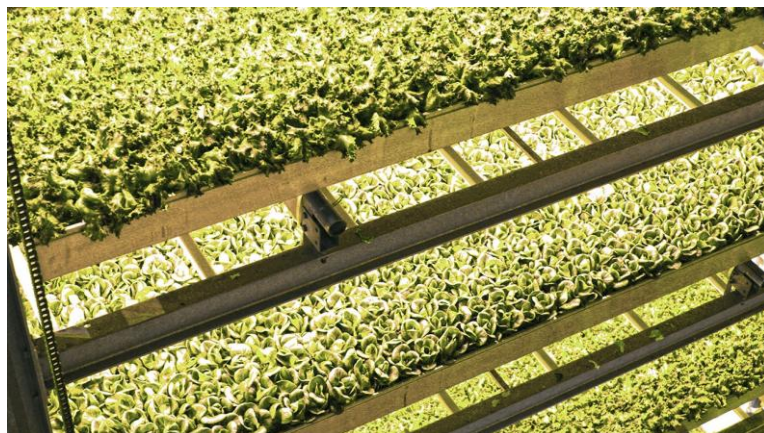


Figura 7. Granja Vertical 80 Acres Farms

Capítulo 4. DEFINICIÓN DEL TRABAJO

4.1 JUSTIFICACIÓN

La producción de alimentos afronta una presión creciente sobre el suelo agrícola, una demanda al alza y la exigencia de métodos más sostenibles en la ciudad. La hidroponía encaja bien en ese escenario: gasta mucha menos agua, aprovecha mejor el espacio y sitúa la producción junto a quien la consume. Son ventajas de peso en viviendas con poca superficie, como un balcón, una terraza o un interior.

Aun así, llevar la hidroponía a casa sigue teniendo barreras: el manejo es complejo, hay que vigilar de continuo variables agronómicas y faltan soluciones flexibles pensadas para quien no es experto. Los equipos domésticos más sencillos ganan en comodidad, pero sacrifican capacidad de adaptación; los más completos apuntan a instalaciones industriales. Ahí queda el hueco para una propuesta intermedia: automática, fácil de usar y viable en formato pequeño.

El trabajo responde a esa necesidad: un sistema de cultivo que una hidroponía e IoT en una solución doméstica, modular y ampliable. Con sensores que siguen la temperatura, la humedad, el pH, la conductividad y el nivel de agua, más una interfaz para consultarlos, se reduce la vigilancia manual y el cultivo gana estabilidad. Detrás hay una motivación tecnológica, pero también muy práctica: producir para el propio consumo en la ciudad, gastar menos recursos y hacer accesible el cultivo en poco espacio.

En lo académico y técnico el proyecto también tiene interés, porque reúne en un mismo desarrollo el diseño mecánico, el control electrónico, las comunicaciones IoT, la sostenibilidad y el análisis de viabilidad. Es, en la práctica, un caso donde confluyen varias ramas de la ingeniería para construir algo funcional, de bajo consumo y fácil de replicar, orientado a producir alimento fresco a pequeña escala.

4.2 OBJETIVOS

El objetivo principal de este proyecto es desarrollar un sistema de cultivo automatizado que ofrezca al usuario una solución sencilla, práctica y accesible para su uso cotidiano. Se busca que el producto pueda implementarse en espacios domésticos reducidos, sin requerir conocimientos técnicos previos, facilitando así la producción de alimentos frescos en entornos urbanos.

El trabajo propone el diseño de una interfaz digital intuitiva que integre tecnologías IoT para el monitoreo y control del cultivo. A través de sensores que envían información en tiempo real, el usuario podrá conocer el estado del sistema, recibir alertas y acceder a guías de uso que optimicen la experiencia de manejo y mantenimiento del dispositivo.

Asimismo, el proyecto tiene como finalidad el desarrollo de un sistema sostenible, adaptable y de bajo consumo energético, capaz de configurarse según las características del espacio disponible y de optimizar el uso de recursos como el agua, la energía y los materiales empleados.

Finalmente, se plantea analizar la viabilidad técnica, económica y ambiental del sistema propuesto, evaluando los costes de implementación, el rendimiento productivo, la facilidad de mantenimiento y el impacto positivo como una solución sostenible orientada al fomento del autoconsumo urbano.

4.3 METODOLOGÍA

La metodología propuesta para el desarrollo del presente trabajo se estructura en cinco fases consecutivas, orientadas a llevar la propuesta desde el análisis conceptual inicial hasta la evaluación técnica, económica y funcional del sistema automatizado de cultivo. Esta metodología se ha definido de forma que permita integrar los aspectos agronómicos,

mecánicos, electrónicos y de control necesarios para el desarrollo de una solución hidropónica doméstica adaptada a espacios reducidos.

En una primera fase, se realiza una investigación inicial centrada en la revisión de literatura científica y técnica sobre hidroponía, agricultura urbana, automatización de cultivos y tecnologías IoT aplicadas al control de variables ambientales y nutritivas. Esta etapa incluye también el análisis de cultivos viables para entornos domésticos y la comparación de diferentes sensores, plataformas de control y soluciones comerciales existentes, con el objetivo de establecer una base técnica sólida para el diseño posterior.

La segunda fase corresponde al diseño del sistema. En esta se aborda el desarrollo conceptual del prototipo, definiendo una solución modular y escalable capaz de adaptarse a espacios como balcones, terrazas o interiores de vivienda. Dentro de esta fase se incluye el diseño del subsistema hidráulico, considerando el recorrido de la solución nutritiva, el depósito, la impulsión mediante bomba y el retorno al tanque, así como los criterios básicos de dimensionamiento y funcionamiento. Del mismo modo, se contempla la simulación o validación digital del comportamiento esperado del sistema, con el fin de anticipar su respuesta antes de la implementación física.

La tercera fase se centra en el desarrollo e integración del sistema IoT. Se define la arquitectura electrónica del prototipo, incluyendo la selección del microcontrolador principal, la conexión de sensores y actuadores y la estructuración del sistema de comunicaciones. Asimismo, se desarrolla la lógica de control necesaria para la monitorización continua del cultivo, el registro de variables y la ejecución de acciones básicas sobre el sistema, como la activación de la bomba o la generación de alertas. Esta fase contempla también la integración de la conectividad remota, de forma que el usuario pueda consultar el estado del sistema mediante una interfaz digital.

Por último, la cuarta fase corresponde a la evaluación técnica y económica del sistema. En esta se incorporan cálculos de dimensionamiento, estimaciones de consumo energético, análisis preliminar del rendimiento esperado del cultivo y valoración del coste de implantación y operación del prototipo. Esta fase resulta clave para determinar la viabilidad

de la propuesta, no solo desde el punto de vista funcional, sino también en términos de coste, mantenimiento y posibilidad de aplicación en el ámbito doméstico. De este modo, la metodología no se limita al desarrollo técnico del prototipo, sino que incorpora también una visión aplicada orientada a su utilidad real, su sostenibilidad y su potencial de transferencia a otros contextos de uso. En conjunto, la metodología planteada permite desarrollar el trabajo de forma estructurada, garantizando la coherencia entre la definición del problema, el diseño del sistema, su validación y el análisis de su viabilidad técnica y económica.

4.4 PLANIFICACIÓN Y ESTIMACIÓN ECONÓMICA

La planificación del trabajo se ha estructurado de forma progresiva, alineando cada etapa con las fases metodológicas definidas previamente y con los objetivos técnicos del proyecto. En una primera fase se aborda la revisión bibliográfica y el análisis del estado de la cuestión, con el fin de identificar soluciones existentes, tecnologías disponibles y variables críticas para el cultivo hidropónico en espacios reducidos. Posteriormente, se desarrolla una fase de diseño conceptual y técnico en la que se define la arquitectura general del sistema, la configuración de la torre de cultivo, el subsistema hidráulico y la propuesta de control electrónico e integración IoT.

A continuación, la planificación contempla la selección e integración de componentes, incluyendo sensores, actuadores, microcontrolador, sistema de alimentación y elementos mecánicos necesarios para el desarrollo del prototipo. Una vez definidos estos elementos, se plantea una fase de desarrollo del sistema de control y monitorización, orientada a la adquisición de datos, supervisión de variables de cultivo y actuación sobre los distintos subsistemas. Finalmente, se reserva una fase de evaluación para el análisis del comportamiento esperado del sistema, su viabilidad técnica y su estimación económica preliminar.

Desde el punto de vista económico, se realiza una estimación inicial del coste de implantación del prototipo a partir de los principales elementos que componen la solución propuesta. Dado que esta evaluación se sitúa en una fase de definición del trabajo, los

importes presentados deben considerarse orientativos, ya que podrán variar en función de la selección final de proveedores, la precisión de los componentes y el método de fabricación de la estructura. Aun así, esta aproximación resulta útil para valorar si el sistema puede desarrollarse dentro de un rango económico razonable para un prototipo doméstico funcional.

Elemento	Coste (€)
Placa microcontroladora	12
Sensor de temperatura impermeable	5
Sensor de temperatura y humedad	2
Sensor de pH con sonda	18
Sensor TDS / conductividad	15
Sensor de calidad del aire	6
Sensor de nivel de agua	2
Sensor consumo	4
Módulo relé	4
Bomba sumergible	8
Fuente de alimentación	10
Cableado, conectores y protoboard o PCB básica	10
Depósito de agua	10
Tuberías	5

Estructura de torre y piezas de unión	15
Total estimado	118

Tabla 1. Estimación del coste del prototipo

A partir de esta estimación, el coste total orientativo del prototipo se sitúa en 118 euros. Este importe es coherente con una solución experimental de pequeña escala orientada al ámbito doméstico, y permite afirmar que el desarrollo del sistema resulta viable desde el punto de vista de la construcción inicial. Además, el desglose pone de manifiesto que las partidas con mayor peso económico son la estructura física, la electrónica y el conjunto hidráulico, mientras que la electrónica de control mantiene un coste relativamente moderado.

Junto al coste de implantación, resulta necesario considerar el coste de operación del sistema, entendido como el gasto asociado al uso continuado del prototipo una vez puesto en funcionamiento. Este bloque incluye el consumo eléctrico de la bomba y del sistema de control, la reposición de agua, la solución nutritiva y otros consumibles menores.

Concepto	Estimación mensual (€)
Consumo eléctrico de bomba y control	2
Reposición de agua	1
Solución nutritiva	4
Semillas y reposición menor	2
Total mensual estimado	9

Tabla 2. Estimación del coste mensual del prototipo

En consecuencia, el coste operativo mensual del sistema puede situarse de forma orientativa en torno a 9 euros. Esta cifra refuerza la viabilidad de la propuesta para aplicaciones de autoconsumo a pequeña escala, ya que el mantenimiento económico del sistema resulta

reducido y compatible con un uso doméstico continuado. En fases posteriores del trabajo, esta estimación podrá relacionarse con el rendimiento esperado del cultivo para valorar con mayor precisión la eficiencia económica global de la solución.

Capítulo 5. SISTEMA DESARROLLADO

Para el desarrollo del sistema se va a plantear una solución para el cultivo de lechugas. Para ello se dividirá en diferentes apartados.

5.1 DISEÑO CONCEPTUAL

El sistema es una torre de cultivo hidropónico vertical pensada para producir lechugas en espacios domésticos pequeños: balcones, terrazas, patios o interiores. Se eligió esta forma por dos motivos. El primero, aprovechar la altura, que en la ciudad es el espacio que sobra; el segundo, poder reunir en una sola estructura el circuito hidráulico, el soporte de las plantas y la electrónica de control. El resultado es una torre compacta, apta para el cultivo y fácil de automatizar.

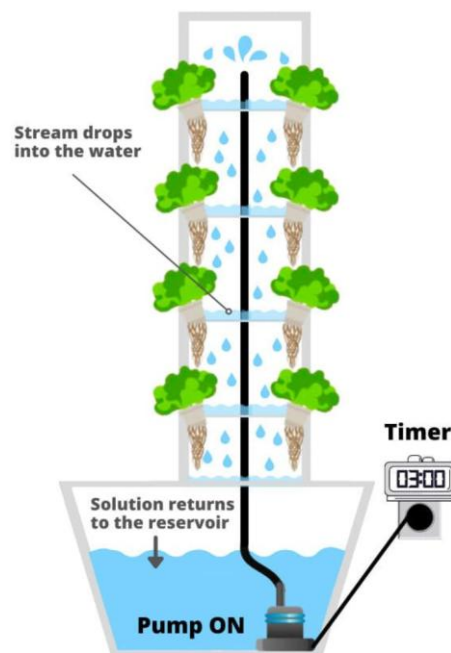


Figura 8. Sistema torre vertical [14]

Desde el punto de vista funcional, el sistema se basa en un depósito inferior que almacena la solución nutritiva, una bomba de impulsión que eleva el agua hasta la parte superior de la torre y un conjunto de módulos de cultivo apilados verticalmente por los que el fluido desciende de forma controlada. El agua bombeada alcanza la celda superior y, a partir de ese punto, circula por gravedad a través de los distintos niveles del sistema, entrando en contacto con las raíces de las plantas antes de retornar de nuevo al depósito. Este esquema establece un circuito cerrado de recirculación que permite optimizar el uso del agua y de los nutrientes, en coherencia con los principios propios de la hidroponía descritos en capítulos anteriores.

La estructura física del prototipo se organiza en varios subconjuntos claramente diferenciados. En la parte inferior se sitúa el tanque o depósito principal, que actúa como reserva de agua y nutrientes y como base portante del sistema. Sobre este depósito se acoplan sucesivamente las celdas de cultivo, diseñadas para alojar las plantas y permitir el paso escalonado de la solución nutritiva entre niveles. En la zona superior se incorpora una tapa o remate final, cuya función es cerrar el conjunto, estabilizar la geometría de la torre y facilitar la entrada del agua impulsada desde la bomba.

Un aspecto clave del diseño conceptual es su carácter modular. Cada celda constituye una unidad repetible que puede añadirse o retirarse en función de la capacidad de cultivo requerida, del espacio disponible o de las limitaciones estructurales del entorno de instalación. Esta modularidad no solo simplifica el montaje y mantenimiento del sistema, sino que además permite plantear futuras ampliaciones del prototipo sin necesidad de rediseñar por completo la solución base. En este sentido, el concepto adoptado resulta adecuado tanto para una primera versión experimental a pequeña escala como para una evolución hacia configuraciones de mayor capacidad.

Desde el punto de vista hidráulico, el diseño parte de una lógica de recirculación vertical. La bomba sumergible impulsa la solución nutritiva desde el depósito hasta el punto más alto del sistema, desde donde el agua se distribuye por gravedad a las distintas celdas. Para favorecer el contacto entre la solución y el sistema radicular de las plantas, cada módulo incorpora superficies o placas intermedias que ralentizan parcialmente el flujo y aumentan el tiempo

de permanencia del agua en la zona de cultivo. De este modo, se evita un tránsito excesivamente rápido del caudal y se mejora la exposición de las raíces a agua, oxígeno y nutrientes.

La torre queda así definida como un sistema hidropónico vertical, recirculante, modular y automatizable, ajustado a lo que pide una vivienda: poco espacio, pocos recursos y un manejo sencillo. Su interés está en combinar una estructura fácil de construir con una base técnica abierta, a la que más adelante se le pueden añadir monitorización, control y mejoras para crecer u optimizar el cultivo.

5.2 CULTIVO DE LECHUGAS

Para desarrollar la solución hay que plantear los parámetros a tener en cuenta para el cultivo de lechugas y el proceso que hay que desarrollar para cultivar lechugas.

Parámetro	Valor
Ph	5.5 y 6.5
Conductividad	1 y 2.3
Temperatura	18 y 22
Humedad relativa	70 %

Tabla 3. Parámetros cultivo lechuga [15]

Antes de llevar el cultivo al sistema hay que tener una bandeja donde poner nuestras semillas y puedan hacer el proceso de germinación. Para este proceso hay que tener estas semillas en humedad con materiales como cubos de lana de roca, pastillas de turba o fibra de coco. Este proceso suele tardar entre 3 y 5 días en completarse en el que el cultivo desarrolla unas raíces fuertes y podrá estar en el sistema. [16]

Para el desarrollo del proyecto hay que tener en cuenta el sustrato y la mezcla que se detallan en esta tabla:

Sustrato	Porcentaje (%)
Fibra de coco	60
Perlita	30
Vermiculita	10

Tabla 4. Sustrato y mezcla [15]

5.3 DISEÑO ESTRUCTURA

Para la configuración del prototipo, se han integrado los componentes de una fuente en thingiverse [17] para empezar con una base el proyecto y poder hacer mejoras en base al desarrollo del proyecto. En el ANEXO II se detallan las piezas de este sistema.



Figura 9. Ejemplo de la solución base [17]

5.4 DISEÑO CONTROL

El diseño de control define cómo el sistema vigila el cultivo, procesa lo que mide y actúa sobre el prototipo para mantenerlo en buenas condiciones. Frente al diseño estructural de los apartados anteriores, aquí interesa el comportamiento dinámico: cómo se capturan los datos, cómo se interpretan y cómo se decide qué hacer en cada situación. Todo ello encaja con la idea del proyecto, una solución hidropónica automatizada, doméstica y barata, apoyada en IoT para supervisar y asistir al usuario.

El sistema se apoya en una arquitectura embebida: una unidad de control central recoge lo que miden los sensores de la torre, evalúa el estado del cultivo y acciona el circuito hidráulico cuando se dan ciertas condiciones. Ese mismo esquema mide las variables ambientales y fisicoquímicas, automatiza el riego recirculante y envía la información a una interfaz para consultarla a distancia. La torre deja así de ser una simple estructura de cultivo y pasa a funcionar con una capa digital que controla y monitoriza todo el proceso.

El control busca algo más que encender y apagar la bomba: quiere una lógica que haga el prototipo más robusto, reduzca la intervención manual y deje traza de lo que ocurre. Para lograrlo, la arquitectura se reparte en tres niveles: adquisición de datos, decisión y actuación. Los siguientes apartados desarrollan cada pieza: el flujo de datos, la lógica de control y la estrategia de monitorización y actuación.

5.4.1 ARQUITECTURA DE CONTROL

La arquitectura de control propuesta responde a un modelo centralizado, en el que un único controlador coordina la adquisición de datos, el procesamiento local de la información y la activación de los actuadores del sistema. Esta decisión es adecuada para un prototipo doméstico de tamaño reducido, ya que simplifica la integración electrónica, reduce el cableado lógico y permite concentrar en una sola unidad la toma de decisiones. Además, este enfoque facilita la incorporación de conectividad inalámbrica para visualización remota, sin necesidad de modificar la filosofía de funcionamiento del sistema.

El flujo de datos comienza en el nivel físico del cultivo, donde distintos sensores miden el estado del agua y del entorno inmediato de las plantas. Las señales generadas por estos dispositivos son captadas por la unidad de control mediante entradas analógicas o digitales, según el tipo de magnitud medida. Una vez recibidas, las lecturas son acondicionadas y transformadas en variables interpretables, tales como temperatura del agua, temperatura y humedad del aire, pH, concentración de sólidos disueltos o nivel del depósito. Este proceso permite convertir la información bruta en datos útiles para la supervisión del sistema y para la ejecución de la lógica de control.

Tras la etapa de adquisición, el sistema ejecuta un proceso de evaluación en el que compara las lecturas obtenidas con los valores de referencia definidos para el cultivo de lechuga. Estos rangos de referencia ya han sido introducidos previamente en el apartado dedicado al cultivo, donde se establecen los intervalos adecuados de pH, conductividad, temperatura y humedad. El uso de estos umbrales permite que el controlador determine si el sistema se encuentra en condiciones normales de funcionamiento o si existe alguna desviación que requiera actuación, bloqueo preventivo o emisión de una alerta.

Una vez procesada la información, el flujo de datos se bifurca hacia dos posibles salidas. La primera corresponde al plano de control local, donde el sistema decide si debe activar o desactivar la bomba en función de la estrategia programada y del estado de seguridad del sistema. La segunda corresponde al plano de información al usuario, donde las variables medidas pueden almacenarse, visualizarse o enviarse a una interfaz remota con fines de supervisión. De esta manera, el flujo de datos conecta el estado físico del cultivo con una respuesta automática del sistema y con una capa de comunicación orientada al seguimiento del proceso.

El funcionamiento se puede resumir en seis etapas encadenadas: medición, adquisición, procesamiento, comparación con umbrales, decisión y, por último, actuación o comunicación. Esta secuencia describe con claridad el sistema como una arquitectura IoT aplicada al cultivo hidropónico y ayuda a verlo como lo que es, una plataforma de monitorización y control, y no un conjunto de componentes electrónicos sueltos.

5.4.2 LÓGICA DE CONTROL DEL SISTEMA

La lógica de control del sistema se ha planteado con un enfoque de automatización básica, priorizando la robustez y la facilidad de implementación frente a estrategias avanzadas de regulación continua. Dado que se trata de un prototipo funcional orientado al autoconsumo doméstico, se ha considerado más adecuado utilizar una lógica de decisión basada en umbrales y eventos discretos que un esquema de control avanzado de mayor complejidad. Este enfoque permite validar la viabilidad del sistema y asegurar un funcionamiento estable sin introducir una carga innecesaria de desarrollo en una primera versión del prototipo.

La variable principal sobre la que actúa el sistema es la recirculación de la solución nutritiva. Para ello, la unidad de control establece ciclos de funcionamiento de la bomba con el objetivo de impulsar periódicamente el agua desde el depósito hasta la parte superior de la torre, garantizando que las raíces reciban riego y nutrientes en intervalos regulares. Esta estrategia se implementa mediante una lógica de activación temporizada, que puede definirse en función de un ciclo fijo de riego o de una secuencia programada ajustada al comportamiento esperado del sistema.

Sin embargo, la activación de la bomba no depende únicamente de una programación temporal, sino también del estado de ciertas variables críticas. Entre ellas, el nivel de agua del depósito ocupa un papel prioritario, ya que una condición de volumen insuficiente puede provocar funcionamiento en vacío, deterioro del actuador o interrupción del riego. Por este motivo, la lógica de control incorpora una condición de seguridad por la cual, si el sensor detecta un nivel inferior al umbral mínimo establecido, se inhibe la activación de la bomba y se genera una condición de alerta. Este mecanismo constituye una medida de protección esencial para la integridad del sistema.

El resto de las variables sensorizadas se emplean principalmente como indicadores del estado del cultivo y de la solución nutritiva. Cuando el sistema detecta desviaciones en parámetros como el pH, la conductividad o la temperatura, la respuesta prevista no es

necesariamente una corrección automática inmediata, sino la generación de información útil para que el usuario realice los ajustes pertinentes, mientras que las condiciones que comprometen la integridad del sistema activan el bloqueo automático de la bomba a través del mecanismo de alerta crítica implementado en la lógica de control. Esta decisión es coherente para un primer prototipo, ya que evita introducir subsistemas adicionales de dosificación automática o climatización, pero mantiene la capacidad de detectar anomalías relevantes para el rendimiento del cultivo.

En consecuencia, la lógica de control puede definirse como una combinación de control temporal, supervisión por umbrales y actuación condicionada por estados de seguridad. Este modelo permite dotar al sistema de una automatización efectiva y técnicamente justificable, manteniendo un equilibrio adecuado entre simplicidad, funcionalidad y potencial de ampliación futura.

La lógica de control combina, entonces, tres ingredientes: temporización, supervisión por umbrales y una actuación sujeta a condiciones de seguridad. Con ello el sistema queda automatizado de forma sencilla pero suficiente, sin renunciar a poder ampliarse más adelante.

5.4.3 ESTRATEGIA DE MONITORIZACIÓN Y ACTUACIÓN

La estrategia de monitorización y actuación del sistema se orienta a mantener una observación continua del estado del cultivo y a intervenir solo cuando resulte necesario para sostener unas condiciones mínimas de funcionamiento. En este contexto, la monitorización permite conocer el estado instantáneo del sistema y aporta una base de información para evaluar el comportamiento del prototipo y mejorar su gestión operativa. Este segundo aspecto es especialmente importante en un proyecto, ya que facilita la validación del sistema y la interpretación posterior de resultados.

La monitorización se realiza mediante la lectura periódica de las variables definidas como más representativas para el sistema de cultivo. Entre ellas se encuentran la temperatura del agua, la temperatura y humedad del aire, el pH de la solución nutritiva, la conductividad

eléctrica que mide la concentración relativa de sólidos disueltos y el nivel del depósito. La observación conjunta de estas magnitudes permite identificar tanto problemas de funcionamiento hidráulico como desviaciones del entorno de cultivo o del estado químico de la solución.

En cuanto a la actuación, el sistema se apoya en un esquema de intervención escalonada. En condiciones normales, la actuación principal se limita a la gestión de la bomba de recirculación, activada según la programación definida por la estrategia de control. Cuando se detecta una condición anómala no crítica, como una desviación en pH o conductividad, el sistema puede registrar el evento y notificar al usuario la necesidad de revisión o mantenimiento. En cambio, cuando la condición detectada compromete la seguridad operativa del prototipo, como ocurre con un nivel insuficiente de agua, la respuesta debe ser inmediata y orientada al bloqueo del actuador para evitar daños.

Este esquema escalonado separa tres tipos de variables: de supervisión, de advertencia y de seguridad. Las primeras informan del estado general, las segundas avisan de desviaciones que pueden perjudicar al cultivo y las terceras disparan una protección automática. La clasificación es útil tanto para el diseño como para entender el sistema, porque deja claro que aquí automatizar es mucho más que encender o apagar cosas: hay detrás una jerarquía de decisiones.

Con esta estrategia, el prototipo funciona de una forma ordenada y fácil de ampliar. De momento basta para validar el sistema en una instalación doméstica pequeña, y más adelante permite sumar funciones nuevas como lodosificación automática, control adaptativo o histórico de datos sin tocar la arquitectura descrita aquí.

5.4.4 ARQUITECTURA SOFTWARE E IMPLEMENTACIÓN

La implementación del sistema de control se organiza en cuatro módulos software independientes, cada uno con una responsabilidad bien delimitada. Esta separación facilita el mantenimiento y la evolución del sistema, ya que cualquier módulo puede ser sustituido o mejorado sin afectar al resto.

Nivel de adquisición. Módulo encargado de interactuar directamente con los sensores físicos y obtener los valores de las variables de control. Abstrae los detalles de cada sensor y proporciona al resto del sistema una estructura de datos uniforme con todas las medidas a monitorear. La correspondencia exacta entre sensores y conexiones hardware se detalla en el ANEXO III.

Nivel de decisión. Módulo central de la lógica de control. Recibe los datos del módulo de adquisición, los compara con los umbrales operativos definidos para el cultivo y determina el estado del sistema y el nivel de alerta. Contiene la máquina de estados que gobierna el comportamiento del prototipo y el mecanismo de seguridad que bloquea la bomba ante condiciones críticas.

Nivel de actuación y visualización. Módulo que ejecuta las órdenes procedentes del nivel de decisión. Controla el relé que gobierna la bomba de recirculación y actualiza la pantalla LCD y los indicadores visuales de alerta. Muestra de forma continua el estado completo del sistema sin interrumpir el resto de las tareas del bucle de control.

Nivel de monitorización remota. Módulo que transmite periódicamente el estado del sistema mediante el protocolo MQTT. El ESP32 publica mensajes JSON estructurados en tópicos específicos de un broker MQTT, desde donde cualquier cliente suscrito puede recibirlos en tiempo real. Un dashboard web se conecta directamente al broker vía WebSocket para mostrar el estado del cultivo sin necesidad de servidor intermedio. Este nivel opera de forma independiente y no afecta al funcionamiento de control, aunque la comunicación falle.

La separación en módulos distingue además entre la versión de simulación, en la que el módulo de adquisición genera valores mediante valores simulados, y la versión de hardware real, en la que ese mismo módulo lee los sensores conectados directamente al microcontrolador. El resto de los módulos operan de forma idéntica en ambos casos.

5.4.5 FLUJO DE DATOS Y TAREAS DEL SISTEMA

El sistema opera mediante un ciclo de control continuo en el que varias tareas independientes se ejecutan de forma coordinada sin bloquearse entre sí. Cada tarea tiene su propia cadencia, de manera que el sistema puede atender simultáneamente la lectura de sensores, el control del riego, la actualización de la interfaz visual y la comunicación remota.

El ciclo comienza con la lectura periódica de todos los sensores, que genera una instantánea del estado del cultivo. Esa información se pasa a la máquina de estados, donde se evalúa frente a los umbrales operativos y se determina si el sistema debe actuar sobre la bomba, mantener el estado actual o activar una alerta. En paralelo, el sistema actualiza la pantalla local y los indicadores visuales con los últimos valores disponibles, y envía periódicamente un resumen del estado al servidor de monitorización remota. El diagrama siguiente ilustra este flujo de forma visual.

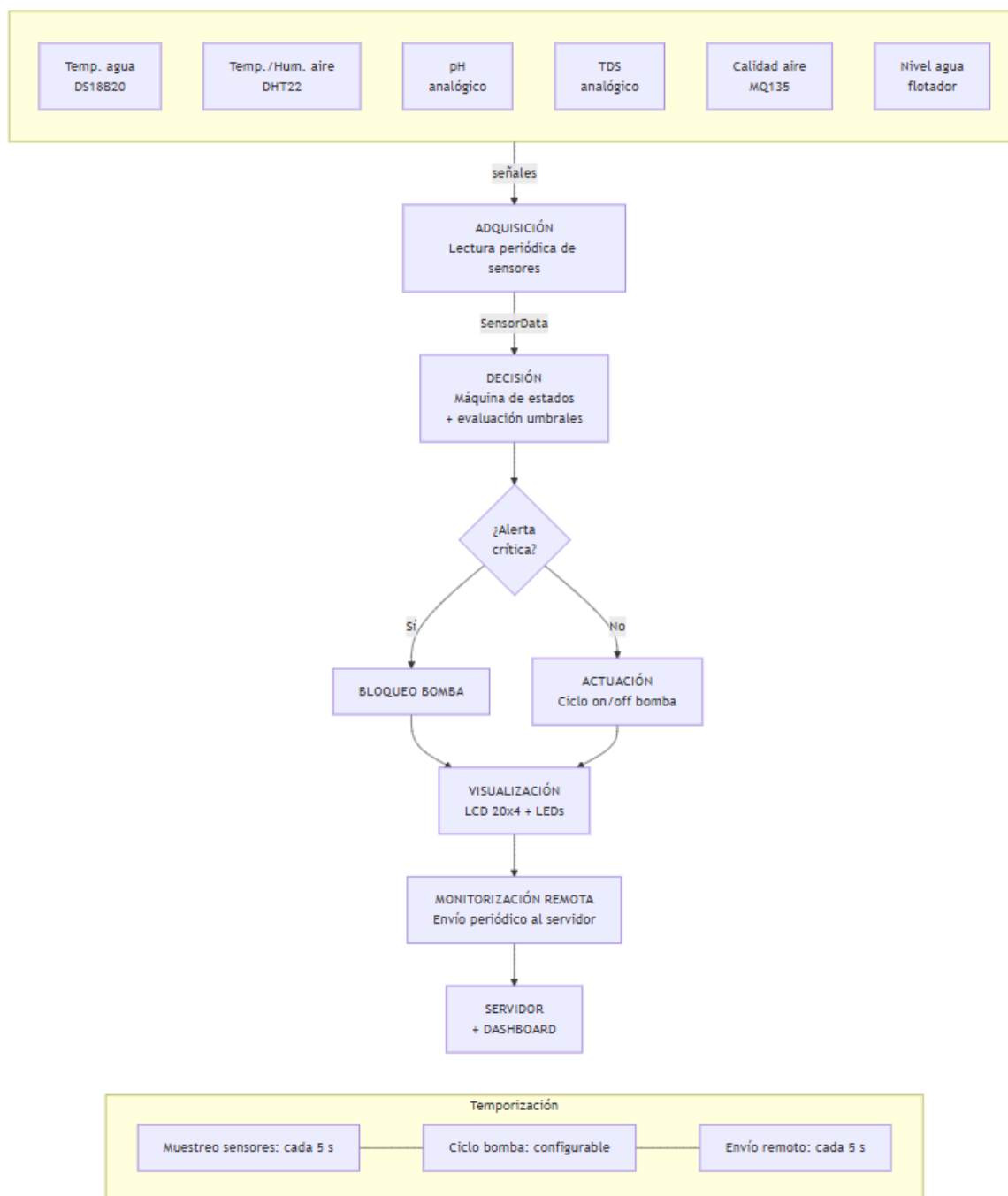


Figura 10. Flujo de datos y ciclo de control del sistema

Como se aprecia en el diagrama, el ciclo de control distingue dos ramas principales. La rama de lectura periódica se activa cada vez que transcurre el intervalo de muestreo configurado: se leen todos los sensores, se pasa la información a la máquina de estados y, en función del

resultado, se actúa sobre la bomba o se genera una alerta. La gestión del ciclo de bomba, en cambio, se evalúa en cada iteración del bucle, independientemente del muestreo, para garantizar que los tiempos de encendido y apagado se respetan con precisión aunque la lectura de sensores no haya concluido. La rama de comunicación y visualización comparte cadencia con el muestreo: el sistema actualiza la pantalla local con los últimos valores disponibles y envía periódicamente un resumen al servidor de monitorización. Los intervalos de cada tarea están centralizados en un fichero de configuración y pueden ajustarse sin modificar el código de control. La lectura de sensores y el envío remoto se producen con la misma cadencia, frecuencia suficiente dada la lenta dinámica de las variables fisicoquímicas del cultivo. Los tiempos de ciclo de la bomba se configuran según las necesidades del sistema de riego: en la fase de simulación se utilizan valores reducidos para facilitar las pruebas, mientras que en el prototipo real se ajustarán a los ciclos de riego adecuados para el cultivo.

5.4.6 MÁQUINA DE ESTADOS

La lógica de control se implementa como una máquina de estados finita que formaliza el comportamiento del sistema ante las distintas situaciones de funcionamiento. Cada estado representa una condición operativa bien definida, con transiciones explícitas que dependen del resultado de la evaluación de sensores o del transcurso del tiempo. El sistema define siete estados diferenciados:

Init es el estado de arranque. Se activa únicamente al encender el sistema y tiene como única función inicializar todos los módulos y realizar una primera lectura de sensores para establecer el estado inicial. Desde aquí se pasa de forma inmediata a **Pump_on** para iniciar el primer ciclo de riego sin espera.

Pump_on representa el ciclo de riego activo. En este estado la bomba está encendida e impulsando la solución nutritiva hacia la parte superior de la torre. El sistema permanece en este estado durante el tiempo de riego configurado. Al cumplirse ese tiempo, pasa automáticamente a **Pump_off**. Si durante este periodo llega el intervalo de lectura de sensores, se pasa temporalmente a **Reading** sin apagar la bomba.

Pump_off es la pausa entre riegos. La bomba está apagada y el sistema aguarda el tiempo de pausa configurado. Antes de reactivar la bomba al final de la pausa, el sistema verifica que el nivel de agua es suficiente, si no lo es el ciclo se pospone hasta que la condición se resuelva. Al igual que en Pump_on, si llega el intervalo de muestreo se pasa a Reading.

Reading es el estado de adquisición de datos. Se activa periódicamente desde Pump_on o Pump_off cuando transcurre el intervalo de muestreo. Lee todos los sensores, construye la estructura de datos con las medidas actuales y pasa inmediatamente a Evaluating para procesar la información.

Evaluating es el estado de decisión. Recibe las lecturas de los sensores y las compara con los umbrales operativos definidos para el cultivo. Si todas las variables están en rango, el sistema vuelve al estado de bomba que corresponda según si estaba activa o en pausa. Si detecta una condición crítica, transiciona a Alert.

Alert es el estado de protección. Se activa ante cualquier condición que pueda comprometer el cultivo o el equipo como nivel de agua insuficiente, temperatura extrema, pH o conductividad fuera del rango de seguridad. En este estado la bomba queda bloqueada y la pantalla muestra la alerta de forma permanente. El sistema permanece en Alert hasta que la siguiente evaluación confirme que la condición ha sido resuelta, momento en el que vuelve a Pump_off.

Idle es un estado reservado para ampliaciones futuras. Actualmente no se utiliza en el ciclo normal de funcionamiento, pero está previsto para situaciones en las que el sistema deba entrar en un periodo de espera explícita por razones distintas a las que gestiona Pump_off, como una pausa forzada por el usuario o un período de mantenimiento programado.

Como muestra el diagrama, el flujo normal alterna entre Pump_on y Pump_off según la temporización del ciclo de riego, interrumpiéndose periódicamente para leer sensores y evaluar el estado del cultivo. La rama de alerta queda claramente separada del ciclo normal, Alert solo se alcanza desde Evaluating y solo se abandona cuando la evaluación confirma que las condiciones han vuelto a ser seguras.

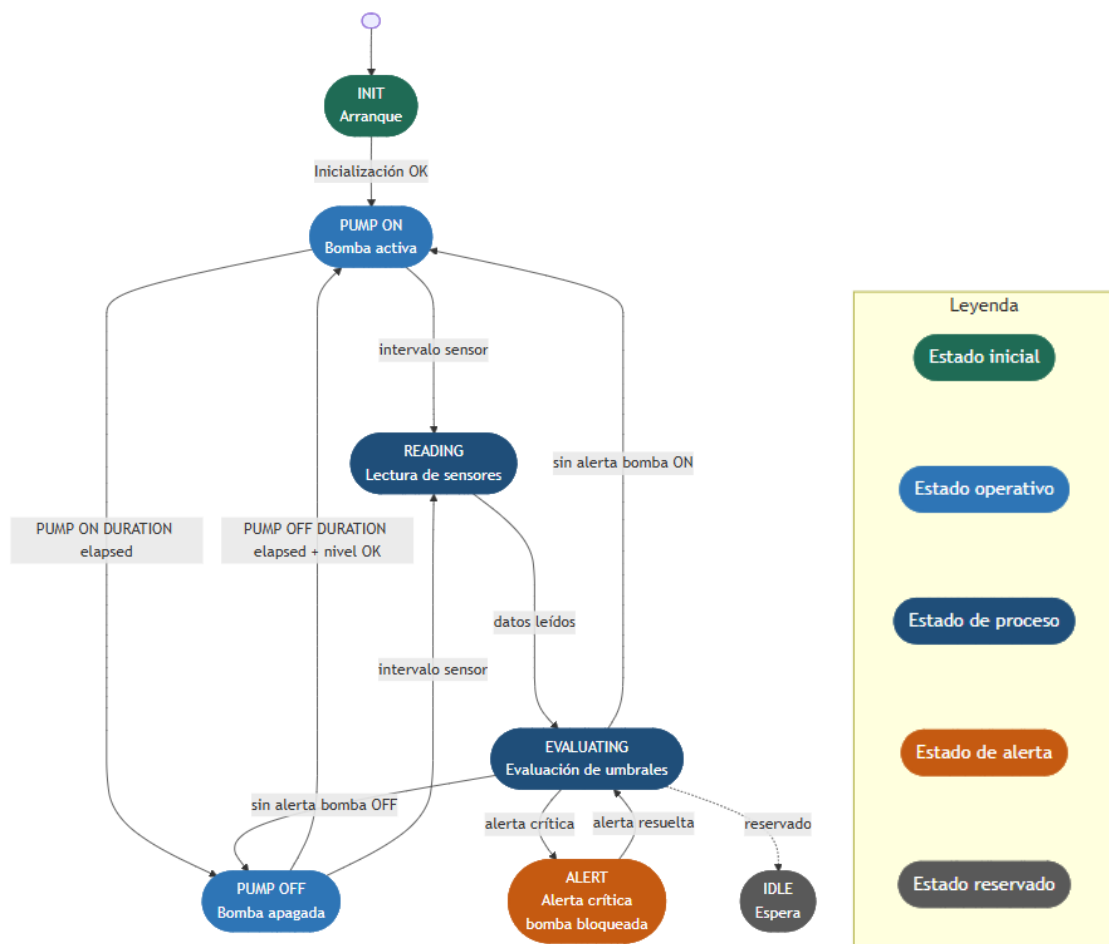


Figura 11. Máquina de estados del sistema de control

El principio de seguridad que rige el diseño es que al mínimo fallo la bomba se apaga. Cualquier fallo en la alimentación o en el procesamiento deja la bomba apagada por defecto, el estado de alerta bloquea cualquier intento de reactivación por software mientras persista la condición de riesgo y antes de cada reactivación al final de una pausa, el sistema verifica que el nivel de agua es suficiente para operar sin riesgo.

5.4.7 LÓGICA DE ALERTAS Y UMBRALES

El sistema distingue tres niveles de alerta que determinan la respuesta ante desviaciones en las variables monitorizadas. En condiciones normales, cuando todos los parámetros se encuentran dentro de los rangos óptimos, el sistema opera sin restricciones y la interfaz visual muestra el estado nominal del cultivo.

Cuando se detecta una desviación que no compromete de forma inmediata la integridad del sistema como un valor de pH que se aleja del óptimo, pero se mantiene dentro del margen de seguridad, o un índice de calidad del aire que supera el umbral de advertencia, se activa un aviso visible en la pantalla y en el indicador luminoso asociado a la variable afectada. La bomba continúa operando con normalidad, pero el aviso permite al usuario tomar las medidas correctoras pertinentes antes de que el problema se agrave.

Las condiciones que activan el nivel de alerta crítica son aquellas que pueden causar daño al cultivo o al equipo de forma inmediata son las siguientes: nivel de agua por debajo del mínimo operativo, temperatura del agua fuera del rango de seguridad, pH que excede los límites de tolerancia del cultivo o conductividad eléctrica que supera el umbral máximo. Ante cualquiera de estas situaciones la bomba se bloquea de inmediato, la pantalla muestra el mensaje de alerta de forma permanente y el sistema permanece en este estado hasta que la siguiente evaluación confirme que la condición ha sido resuelta.

La evaluación sigue un orden de prioridad estricto, el nivel de agua se comprueba primero y, si resulta insuficiente, se interrumpe la evaluación del resto de variables. Todos los umbrales están centralizados en el fichero de configuración del sistema y pueden modificarse para adaptar el prototipo a otros cultivos con distintos requisitos fisicoquímicos.

5.4.8 VALIDACIÓN DE MEDIDAS

El sistema incorpora varios mecanismos para garantizar que las decisiones de control se toman a partir de lecturas fiables. La capa de adquisición identifica automáticamente las situaciones en las que un sensor no proporciona datos válidos como un fallo de comunicación o lectura fuera de rango y lo notifica al módulo de decisión para que evite actuar sobre la bomba en condiciones de incertidumbre.

El sensor de nivel de agua actúa como una salvaguarda física independiente, su estado se verifica antes de cada ciclo de activación de la bomba y su condición de fallo activa directamente el nivel de alerta crítica, independientemente del resultado del resto de comprobaciones.

En la fase de simulación, las lecturas de los sensores analógicos se generan mediante mapeos del rango del convertidor analógico-digital, lo que permite validar el comportamiento de la lógica de control sin necesidad de hardware físico. Para el prototipo real, estos mapeos deberán sustituirse por las curvas de calibración específicas de cada sensor, obtenidas mediante soluciones de referencia para el pH y la conductividad.

5.4.9 DASHBOARD DE MONITORIZACIÓN REMOTA

En la fase de simulación, el sistema incorpora un subsistema de monitorización remota que permite visualizar en tiempo real el estado del cultivo desde cualquier navegador web de la misma red local. Este subsistema está concebido como herramienta de validación del prototipo y consta de tres componentes que trabajan de forma coordinada.

El microcontrolador transmite periódicamente un resumen del estado del sistema a un servidor que se ejecuta en un ordenador de la misma red local. El servidor actúa como intermediario, recibe los datos, los enriquece con información temporal y una clasificación del estado de cada variable, y los distribuye en tiempo real a todos los clientes conectados.

La interfaz de usuario es una página web que se actualiza de forma automática al recibir nuevos datos. Muestra el valor actual de cada variable con un código de color que indica si se encuentra en rango normal, en zona de advertencia o en condición crítica, y mantiene un histórico reciente con la evolución temporal de cada medida. Tanto el servidor como la interfaz están diseñados para funcionar sin dependencias externas y con una configuración mínima, lo que facilita su despliegue en el entorno de simulación. En la versión de hardware real, esta arquitectura de monitorización evolucionaría hacia un modelo orientado al usuario final. El objetivo es que cualquier dispositivo como un teléfono móvil, tablet u ordenador pueda conectarse directamente al sistema hidropónico a través de una aplicación o una interfaz web, sin necesidad de un servidor intermedio ejecutándose en un PC. En este escenario, el microcontrolador actuaría como punto de acceso o se conectaría a la red doméstica, y el usuario accedería al dashboard directamente desde su dispositivo mediante una aplicación dedicada o un navegador, pudiendo consultar el estado del cultivo, recibir notificaciones de alerta y ajustar parámetros de forma remota desde cualquier lugar.

5.5 ELEMENTOS DE CONTROL

Definida ya la arquitectura de control, toca describir los componentes físicos que la hacen posible. Este apartado recoge el hardware elegido para tomar datos, actuar sobre el circuito hidráulico y alimentar el prototipo. En cada caso primaron el coste, la disponibilidad, la facilidad para integrarlo y su encaje en un sistema doméstico y automatizado.

Este conjunto tiene que cumplir tres cometidos: medir el estado del sistema, procesar esa información y ejecutar acciones con seguridad. Para ello se emplean un microcontrolador central, varios sensores repartidos según la variable que miden, la bomba de recirculación y una fuente de alimentación ajustada a las necesidades eléctricas. Juntos hacen realidad la estrategia de control del apartado anterior y dejan margen para ampliaciones.

5.5.1 MICROCONTROLADOR

El microcontrolador es el cerebro del sistema: lee las señales de los sensores, ejecuta la lógica de control y manda sobre la bomba de recirculación. Más que un puente electrónico, es el punto donde se toman las decisiones y donde confluyen la monitorización, la automatización y la conexión a la red.

Para este proyecto, la selección del controlador debe responder a varios requisitos funcionales. En primer lugar, debe disponer de suficientes entradas y salidas para conectar sensores analógicos y digitales, así como para gobernar actuadores mediante módulos intermedios de conmutación. En segundo lugar, debe ofrecer capacidad de comunicación inalámbrica, dado que una de las características diferenciales del sistema es la posibilidad de incorporar supervisión remota mediante tecnologías IoT. En tercer lugar, debe tratarse de una plataforma de bajo coste, fácil programación y amplia disponibilidad, acorde con el carácter académico y doméstico del prototipo.

Bajo estos criterios, una opción especialmente adecuada para el desarrollo del sistema es el empleo de un microcontrolador con conectividad integrada, como una placa basada en ESP32. Este tipo de plataforma reúne en un único dispositivo capacidad de procesamiento,

conectividad Wi-Fi y Bluetooth, múltiples interfaces de entrada y salida y un coste reducido, lo que la convierte en una solución muy conveniente para aplicaciones IoT de pequeña escala. Además, su integración simplifica el diseño general del sistema al evitar la necesidad de módulos de comunicación externos y facilita el desarrollo posterior de funciones de monitorización remota.

Desde el punto de vista operativo, el microcontrolador ejecuta de forma cíclica el programa de control del sistema. En cada ciclo de operación, lee el estado de los sensores, procesa las variables medidas, compara los resultados con los umbrales establecidos para el cultivo y decide la actuación correspondiente. Asimismo, puede registrar eventos, enviar información a una interfaz externa y gestionar alarmas cuando se detectan desviaciones relevantes o condiciones de funcionamiento inseguras. Por tanto, su papel dentro del prototipo es esencial para transformar un sistema hidropónico pasivo en un sistema automatizado y supervisado.

5.5.2 SENSORES

Los sensores constituyen el subsistema encargado de captar información sobre el estado del cultivo, de la solución nutritiva y del entorno de operación. Su incorporación resulta imprescindible para poder aplicar una estrategia de control basada en datos, ya que permiten sustituir la supervisión manual por una monitorización continua y objetiva. En el prototipo desarrollado se han considerado sensores orientados a medir variables térmicas, ambientales, químicas y de seguridad hidráulica.

5.5.2.1 Temperatura

Para medir la temperatura de la solución nutritiva se selecciona el sensor DS18B20, que presenta como principal ventaja su posibilidad de inmersión directa gracias a su encapsulado estanco. Esta característica lo hace especialmente apropiado para aplicaciones hidropónicas, donde la medición debe realizarse dentro del depósito o en contacto con el agua recirculante. Frente a otros sensores más orientados a medición ambiental, el DS18B20 ofrece una solución más robusta para entornos húmedos y simplifica su integración física en el sistema.

La temperatura del agua es una variable relevante porque condiciona la absorción de nutrientes, la oxigenación de la solución y el comportamiento general del cultivo. Su monitorización permite verificar si el sistema opera dentro de los rangos previstos para la lechuga y detectar situaciones que puedan afectar al desarrollo radicular o al equilibrio del medio de cultivo.



Figura 12. Sensor DS18B20 [18]

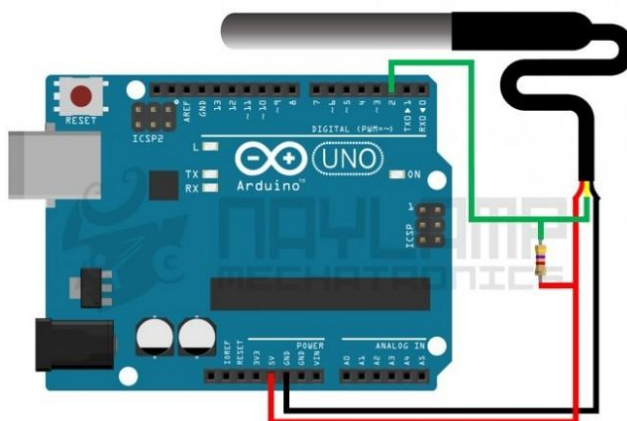


Figura 13. Conexión DS18B20 con la placa [18]

5.5.2.2 Temperatura y Humedad

Para la medición de la temperatura y humedad relativa del entorno se plantea el empleo del sensor DHT11, que integra ambas variables en un único dispositivo. Este sensor resulta adecuado para una primera implementación del prototipo por su bajo coste, facilidad de conexión y amplia disponibilidad en entornos educativos y de prototipado. Aunque existen

soluciones más precisas, su uso es razonable en una fase inicial en la que el objetivo principal es validar el comportamiento global del sistema y obtener una referencia básica del ambiente de cultivo.

La información proporcionada por este sensor permite contextualizar el funcionamiento del prototipo dentro de un entorno doméstico real. De este modo, es posible relacionar el comportamiento del cultivo con las condiciones ambientales exteriores al circuito hidráulico, especialmente en instalaciones ubicadas en interiores, balcones o terrazas donde la temperatura y la humedad pueden presentar variaciones significativas.

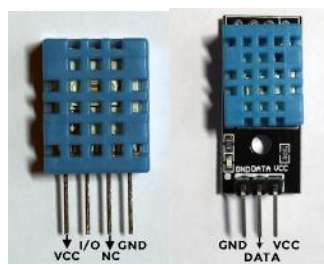


Figura 14. Sensor DHT11 sin PCB (izq) y con PCB (der) [19]

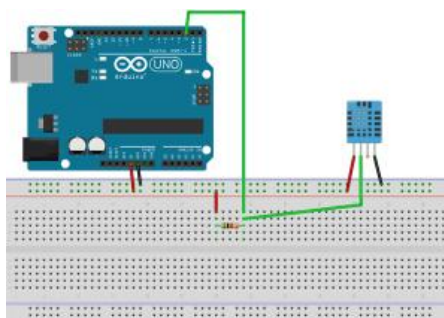


Figura 15. Conexión DHT11 sin PCB a la placa [19]

5.5.2.3 Ph

El control del pH resulta fundamental en cualquier sistema hidropónico, ya que determina la disponibilidad de nutrientes para la planta y condiciona la eficiencia de la absorción radicular. Para esta función se plantea la utilización del módulo PH-4502 junto con su sonda

correspondiente, solución ampliamente utilizada en proyectos de monitorización básica de calidad del agua. Este componente permite obtener una referencia continua del estado ácido-base de la solución nutritiva y comprobar si los valores medidos se mantienen dentro del intervalo adecuado para el cultivo seleccionado

En el contexto del proyecto, la medida de pH tiene un papel principalmente de supervisión y alerta. Aunque el prototipo no contempla en esta fase un sistema automático de corrección química, la disponibilidad de esta información permite detectar desviaciones, registrar tendencias y asistir al usuario en las tareas de mantenimiento del depósito.

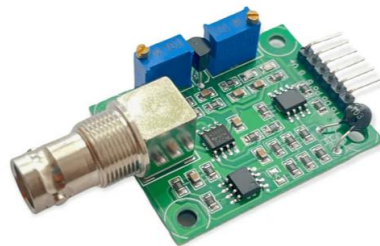


Figura 16. Sensor PH-4502 [20]

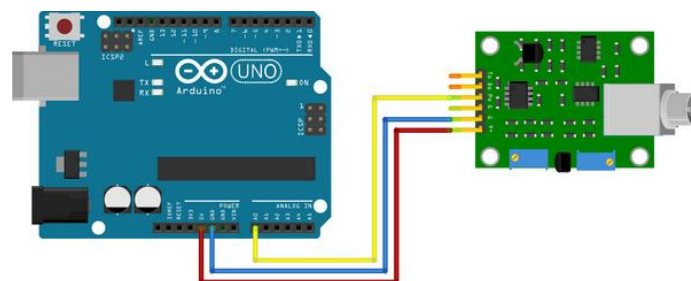


Figura 17. Conexión PH-4502 a la placa [20]

5.5.2.4 Conductividad eléctrica

La conductividad eléctrica de la solución nutritiva es uno de los parámetros más relevantes en hidroponía, ya que refleja de forma indirecta la concentración total de sales y nutrientes disueltos en el agua. Una conductividad demasiado baja indica que la solución está agotada

y las plantas no disponen de los elementos necesarios para su desarrollo; una conductividad excesivamente alta puede provocar estrés osmótico, impidiendo que las raíces absorban agua con normalidad. El sensor empleado es una sonda de tipo TDS (Total Dissolved Solids), que mide la conductividad eléctrica de la solución y la expresa en milisiemens por centímetro (mS/cm).

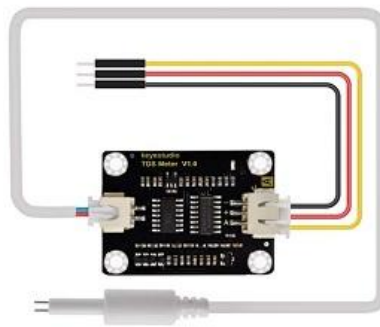


Figura 18. Sensor TDS Meter [21]

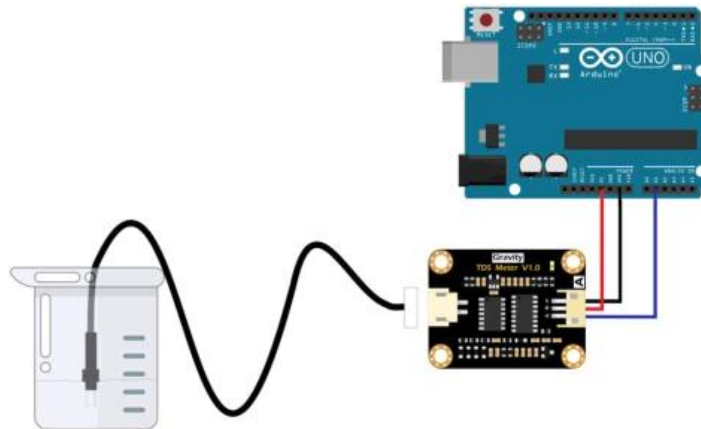


Figura 19. Conexión TDS Meter a la placa [22]

5.5.2.5 Aire

Como sensor complementario se considera el uso del MQ135, orientado a la monitorización general de la calidad del aire. Aunque esta variable no es tan crítica como el nivel de agua, el pH o la temperatura de la solución, su incorporación puede aportar información adicional sobre el entorno de instalación del prototipo, especialmente cuando el sistema se ubica en

espacios interiores. Su función dentro del proyecto debe entenderse como un elemento accesorio de caracterización ambiental más que como una magnitud principal para la toma de decisiones agronómicas.

La inclusión de este sensor puede justificarse también desde la perspectiva IoT del sistema, al ampliar el conjunto de variables registradas y reforzar la idea de monitorización integral del entorno doméstico. No obstante, conviene señalar en la memoria que su peso dentro de la lógica principal de control es secundario respecto a otras variables directamente vinculadas al riego y al estado de la solución nutritiva.

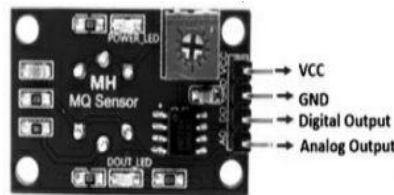


Figura 20. Sensor MQ135 [23]

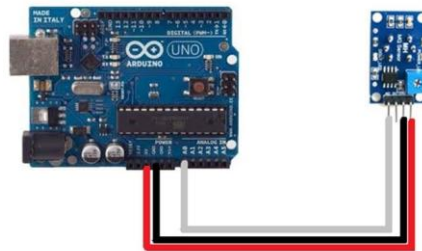


Figura 21. Conexión Sensor MQ135 [24]

5.5.2.6 Nivel del agua

El sensor de nivel de agua desempeña una función crítica dentro del sistema, ya que permite verificar si el depósito dispone de suficiente volumen para garantizar la recirculación sin comprometer la integridad de la bomba. A diferencia de otras variables empleadas principalmente para supervisión del cultivo, esta magnitud se encuentra directamente

relacionada con la seguridad de funcionamiento del prototipo. Por este motivo, su lectura interviene de forma prioritaria en la lógica de control descrita en el apartado anterior.

Cuando el nivel de agua cae por debajo del umbral definido, el sistema debe bloquear la activación de la bomba y generar una alerta para que el usuario reponga el depósito. Este comportamiento protege al actuador frente al funcionamiento en vacío y evita interrupciones en el ciclo hidráulico, por lo que el sensor de nivel se convierte en uno de los elementos más importantes del subsistema de control.



Figura 22. Sensor agua [25]

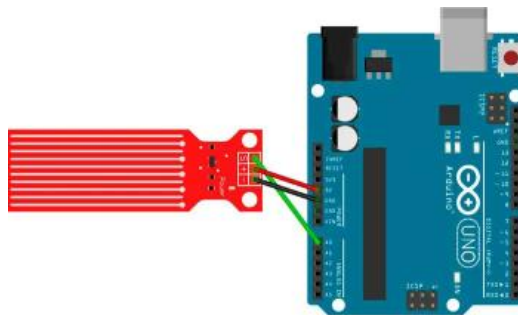


Figura 23. Conexión sensor agua [26]

5.5.2.7 Consumo

Para que el sistema pueda funcionar de forma eficiente y autónoma, resulta necesario conocer su consumo eléctrico real. Por ello se ha incorporado un elemento dedicado a medir la energía que utiliza el conjunto de la electrónica de control: un medidor de consumo basado en el sensor INA219.

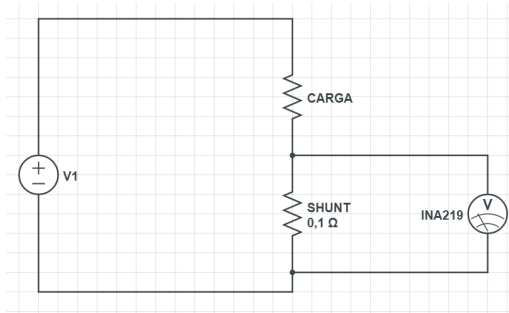


Figura 24. Esquema con medidor de consumo [27]

El INA219 es un monitor de corriente y potencia con interfaz digital I2C. Se conecta en la entrada de alimentación de la placa, en serie con el resto de la electrónica, de manera que mide la tensión, la corriente y la potencia consumidas por todo el sistema, incluido el propio microcontrolador. Al comunicarse por I2C, comparte el mismo bus que la pantalla LCD sin necesidad de pines adicionales, ya que cada dispositivo responde en una dirección distinta. La bomba de agua, al ser una carga externa que no se alimenta a través de la placa, se contabiliza de forma separada a partir del estado del relé.

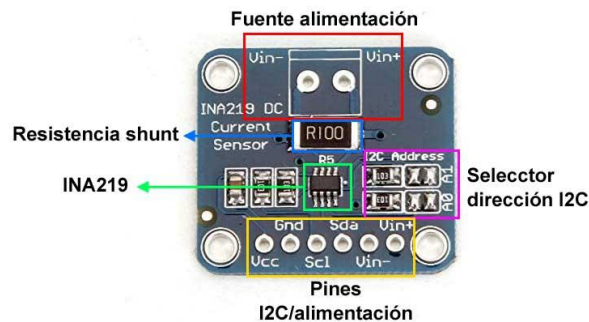


Figura 25. Sensor consumo INA219 [27]

De este modo, el medidor proporciona el consumo en tiempo real, que se trata como una variable más del sistema y se transmite por MQTT para visualizarse en el panel de monitorización junto al resto de parámetros. Esta información constituye la base para dimensionar la fuente de alimentación y estimar la autonomía del prototipo, aspectos que se analizan en el capítulo de resultados.

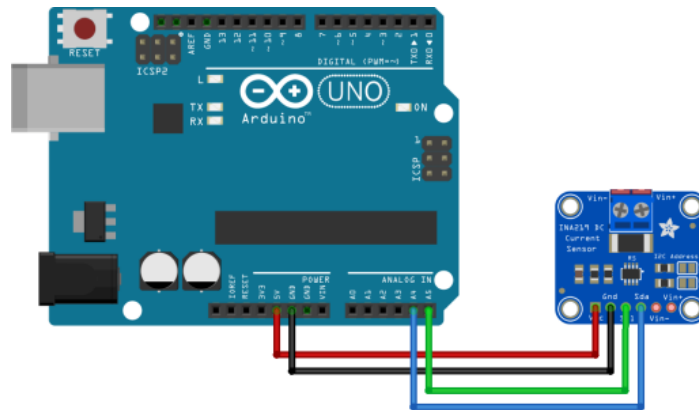


Figura 26. Conexión INA219

En el entorno de simulación, donde no existen corrientes reales que medir, el comportamiento del INA219 se reproduce mediante un componente emulado que calcula el consumo a partir del estado de los actuadores, de forma que la medida sigue siendo coherente con el funcionamiento del sistema. Al pasar al prototipo físico basta con activar la medición real, sin necesidad de modificar el resto del programa.

5.5.3 ACTUADORES

Los actuadores constituyen los elementos encargados de ejecutar físicamente las órdenes generadas por la unidad de control. En la configuración planteada para este prototipo, el actuador principal es la bomba de agua, responsable de impulsar la solución nutritiva desde el depósito inferior hasta la parte superior de la torre de cultivo. A través de este movimiento se hace posible el circuito de recirculación descrito en el diseño conceptual y se garantiza el suministro periódico de agua y nutrientes a las raíces de las plantas.

5.5.3.1 Bomba

La bomba seleccionada debe proporcionar un caudal suficiente para elevar la solución nutritiva hasta la parte superior de la torre y mantener un flujo adecuado a través de las celdas de cultivo. Para este proyecto se contempla una bomba de 5 V como solución inicial de bajo coste y fácil integración en prototipos compactos. Este tipo de actuador resulta apropiado para una primera implementación experimental, siempre que su capacidad de elevación y

caudal sean compatibles con la altura efectiva del sistema y con el volumen de agua a recircular.



Figura 27. Bomba 5V [28]

Desde el punto de vista del control, la bomba no debe conectarse directamente a la salida lógica del microcontrolador, sino a través de una etapa de potencia intermedia, como un relé o módulo de conmutación. Esta solución permite adaptar los niveles eléctricos de control a los requerimientos del actuador y protege la electrónica principal frente a corrientes que no pueden ser suministradas directamente por la placa. En consecuencia, la bomba actúa como elemento final de ejecución dentro de una cadena de control que comienza con la captación de datos y termina con la activación física del sistema hidráulico.

Aunque en esta fase el sistema solo incorpora un actuador principal, la arquitectura planteada admite la futura incorporación de otros elementos de actuación. Entre ellos podrían considerarse bombas de dosificación de nutrientes, iluminación artificial, ventilación o válvulas adicionales, lo que confirma el carácter escalable del diseño propuesto.

5.5.3.2 Fuente de alimentación

La fuente de alimentación es el elemento encargado de suministrar energía de forma estable al conjunto del sistema de control y actuación. Su diseño debe contemplar no solo la alimentación del microcontrolador, sino también la de los sensores, módulos auxiliares y actuadores que formen parte del prototipo. En este tipo de sistemas, una selección inadecuada de la alimentación puede provocar lecturas inestables, fallos de comunicación o

funcionamiento irregular de la bomba, por lo que su definición debe considerarse parte integrante del diseño técnico.

Dado que los distintos componentes pueden operar a tensiones diferentes, la arquitectura de alimentación debe plantearse de forma ordenada. El microcontrolador y algunos sensores trabajan habitualmente a niveles de baja tensión, mientras que la bomba y ciertos módulos de actuación pueden requerir una demanda de corriente superior. Por esta razón, resulta recomendable separar conceptualmente la alimentación de control y la alimentación de potencia, aunque ambas partan de una fuente común adaptada a la tensión nominal del sistema. Esta organización mejora la estabilidad del conjunto y reduce la probabilidad de interferencias eléctricas durante el funcionamiento.

En el caso del prototipo propuesto, la fuente de alimentación debe ser compatible con los requisitos de la bomba seleccionada y con la electrónica de control. Además, debe incorporar un margen suficiente para absorber picos de consumo durante el arranque del actuador o durante la operación simultánea de varios sensores. Desde la perspectiva del diseño, este apartado refuerza la viabilidad técnica del sistema, ya que demuestra que la solución no se plantea únicamente desde el punto de vista funcional, sino también desde sus necesidades eléctricas reales.

Capítulo 6. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Este capítulo recoge los resultados obtenidos durante la fase de simulación del sistema hidropónico en el entorno Wokwi, los indicadores cuantitativos de rendimiento del sistema y un análisis crítico de sus limitaciones.

6.1 RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN

La simulación se ha ejecutado en Wokwi integrado con PlatformIO y VS Code. El circuito virtual incorpora un ESP32 DevKit, dos sensores de temperatura, tres potenciómetros que simulan pH, TDS y CO₂, sensor de consumo, un switch que emula el sensor de nivel de agua, siete LEDs de alerta, un LCD 20×4 I2C y la bomba representada como LED adicional. Todos los valores son ajustables en tiempo real, lo que permite reproducir rápidamente cualquier escenario de prueba.

6.1.1 VALIDACIÓN DE LA LÓGICA DE CONTROL Y LA MÁQUINA DE ESTADOS

Se han validado los siete estados de la máquina de estados y todas las transiciones en el apartado de Máquina de Estados. El ciclo nominal de riego funciona correctamente con los tiempos reducidos de simulación (10s encendida/20s apagada), alternando de forma estable sin bloqueos durante un tiempo de ejecución continua. La detección de alertas críticas ha sido verificada para los cuatro casos previstos.

El escenario de nivel de agua bajo se activa accionando el switch, la transición al estado de alerta crítica se produce en la siguiente evaluación, la bomba se bloquea y el LED rojo y la LCD muestran la alerta. Al cambiar el switch, el sistema retorna automáticamente al estado de pausa entre riegos en la siguiente iteración de evaluación. El mismo comportamiento se ha verificado para los escenarios de temperatura del agua fuera de rango, pH extremo y TDS excesivo. La tabla siguiente resume los casos de prueba ejecutados y el resultado obtenido.

Caso de prueba	Nivel de alerta esperado	Detección (s)
Todos los parámetros en rango óptimo	NORMAL	—
pH fuera del rango óptimo, pero dentro del seguro	AVISO	≤ 5
pH crítico (< 5 o > 7)	CRÍTICO + bomba bloqueada	≤ 5
TDS > 3 mS/cm	CRÍTICO + bomba bloqueada	≤ 5
Nivel de agua bajo	CRÍTICO + bomba bloqueada	≤ 5
Recuperación tras alerta	NORMAL, bomba desbloqueada	≤ 5
Comando remoto bomba OFF vía MQTT	Bomba apagada (modo manual)	< 1

Tabla 5. Casos de prueba validados en la simulación Wokwi

6.1.2 MÉTRICAS DE RENDIMIENTO Y CONSUMO DEL SISTEMA

Los parámetros cuantitativos clave del sistema se recogen en las siguientes tablas. Los valores de simulación proceden de la configuración del firmware y de las mediciones realizadas durante las pruebas en Wokwi, los del prototipo real corresponden a estimaciones basadas en las especificaciones de los componentes y en los ciclos de riego adecuados para el cultivo de lechuga.

Muestreo y temporización	Simulación	Prototipo real
Frecuencia de muestreo de sensores	1 muestra cada 5 s (0,2 Hz)	1 muestra cada 5 s (0,2 Hz)
Tiempo máximo de detección de alerta	≤ 5 s (ciclo de muestreo)	≤ 5 s
Ciclo de bomba	10 s encendida / 20 s apagada	5 min encendida / 25 min apagada
Ciclo de trabajo de la bomba	33 %	17 % (82 min/día)
Latencia de comunicación MQTT	< 200 ms	< 100 ms

Tabla 6. Métricas muestreo y temporización

Umbral Crítico Sensores	
Nivel agua	Señal LOW (switch)
pH (zona de seguridad)	Fuera de [5,0 – 7,0]
TDS (concentración máxima)	> 3,0 mS/cm
Temperatura del agua	Fuera de [16 – 24 °C]

Tabla 7. Umbrales de alerta crítica de los sensores

Métricas Consumo	
Consumo con bomba encendida	3,8 – 5,8 W (760–1.160 mA a 5V)
Consumo con bomba apagada	2,8 W (553 mA a 5V)
Consumo medio estimado	3,0 – 3,5 W
Componentes de mayor consumo continuo	MQ135 (750 mW), LCD (600 mW)

Tabla 8. Métricas consumo

6.1.3 LIMITACIONES SIMULACIÓN FRENTE AL PROTOTIPO FÍSICO

La simulación en Wokwi permite validar la lógica de control, la máquina de estados y el protocolo de comunicación sin hardware físico, pero presenta limitaciones estructurales que es necesario tener en cuenta al interpretar los resultados.

La primera y más relevante es la ausencia de ruido analógico real. Los potenciómetros que simulan pH, TDS y CO₂ generan señales perfectamente lineales y estables, sin el ruido de conversión ADC, interferencias eléctricas ni deriva térmica que presentan los sensores reales. El sensor PH-4502C real requiere calibración con soluciones tampón y ajuste de coeficientes de pendiente e intersección, mientras que en simulación el mapeo es puramente lineal. El sensor TDS real aplica compensación de temperatura y una curva cuadrática estándar de conversión, y el MQ135 requiere un precalentamiento de aproximadamente un minuto antes de generar lecturas estables.

La segunda limitación es la simplificación del comportamiento eléctrico. En hardware real, el arranque de la bomba genera un pico de corriente que puede provocar caídas de tensión en la línea de alimentación del ESP32. Asimismo, el módulo de relé real puede ser activo LOW, lo que requiere invertir la lógica en el firmware respecto a la simulación, donde el LED del relé es activo HIGH.

La tercera limitación afecta a la comunicación MQTT. La red virtual de Wokwi introduce una latencia adicional no representativa de una instalación doméstica real. El broker público HiveMQ añade un retardo variable entre 50 y 200 ms según la carga del servidor, en hardware real con un broker Mosquitto local la latencia de entrega sería inferior a 10 ms.

La cuarta limitación es la ausencia de ciclos de riego reales. Los tiempos de ciclo se han reducido para simulación (10 s/20 s frente a 5 min/25 min en producción), lo que permite observar múltiples ciclos en un tiempo razonable de prueba, pero no valida la inercia hidráulica real, las pérdidas de carga en la torre ni la evaporación del depósito. La validación completa de estos aspectos requiere pruebas con hardware físico y agua real.

En resumen, la simulación valida correctamente la lógica de control, la gestión de alertas y la comunicación MQTT, pero no puede reproducir la variabilidad de los sensores analógicos reales, los efectos eléctricos de los actuadores ni la dinámica hidráulica del sistema de cultivo. Estos aspectos se abordarán en la siguiente fase del proyecto, correspondiente a la construcción y prueba del prototipo físico.

6.2 CONSUMO ENERGÉTICO

El consumo energético del sistema se estima a partir de las especificaciones de cada componente. Se distinguen dos escenarios: bomba encendida (ciclo de riego activo) y bomba apagada (pausa entre riegos). Con un ciclo de trabajo de la bomba del 15-25 % del tiempo en producción, el consumo medio se sitúa en el extremo inferior del rango.

Componente	Tensión (V)	Corriente típica (mA)	Consumo (mW)
ESP32 DevKit (activo)	3,3 / 5	240	792

DS18B20 (conversión)	3,3	1,5	5
DHT11	3,3	0,3	1
PH-4502C	5	20	100
Sensor TDS	5	20	100
INA219	3,3 / 5	1	3
MQ135	5	150	750
Sensor flotador	3,3	1	3
LCD 20x4 I2C	5	120	600
Modulo relé	5	70	350
LEDs de alerta (x6)	3,3	20	66
Bomba 5 V (ON)	5	200-600	1.000- 3.000

Tabla 9. Consumo Energético del sistema

Sumando los consumos anteriores se obtienen los siguientes valores estimados:

- **Con bomba encendida:** consumo total aprox. $2.767 + 1.000-3.000 \text{ mW} = 3,8 - 5,8 \text{ W}$ (a 5 V aprox. 760 - 1.160 mA).
- **Con bomba apagada:** consumo total aprox. $2.767 \text{ mW} = 2,8 \text{ W}$ (a 5 V aprox. 553 mA).
- **Consumo medio estimado (15 % duty de bomba):** aprox. 3,0 - 3,5 W. El componente dominante en todo momento es el sensor MQ135 (aprox. 750 mW), seguido de la LCD (aprox. 600 mW) y el módulo relé (aprox. 350 mW).

Más allá de esta estimación basada en las especificaciones de cada componente, el sistema incorpora la medición directa del consumo mediante el sensor INA219 descrito en el apartado de elementos de control. En el prototipo físico, este sensor mide la tensión, la corriente y la potencia reales de toda la electrónica en la entrada de alimentación. En la simulación, la misma cadena de medida se reproduce mediante el chip personalizado que emula el INA219, de modo que los valores de consumo mostrados en el panel proceden de lecturas y no de un cálculo teórico. Durante las pruebas en Wokwi se ha comprobado que el consumo evoluciona de forma coherente con el estado del sistema: aumenta aproximadamente 70 mA al activarse la bomba y alrededor de 6 mA por cada LED de aviso encendido, y el módulo acumula además la energía consumida a lo largo de la sesión. Esta instrumentación permite contrastar los valores estimados con medidas efectivas y respalda el análisis de autonomía que se presenta a continuación.

6.3 AUTONOMÍA POTENCIAL

Dado que el sistema está concebido para uso doméstico permanente, la alimentación principal es mediante adaptador de red (5 V / 2-3 A USB o fuente regulada), lo que proporciona una autonomía ilimitada. No obstante, se analiza también la viabilidad de operación con batería para escenarios de corte de suministro o instalaciones sin toma de corriente próxima:

Fuente de alimentación	Capacidad	Autonomía estimada	Observaciones
Power bank 10.000 mAh (5 V)	50 Wh	12 - 16 h	Considerando 90 % eficiencia y consumo medio de 3,0-3,5 W
Power bank 20.000 mAh (5 V)	100 Wh	24 - 33 h	Viable para ausencias de 1 día
Batería LiPo 3,7 V / 5.000 mAh	18,5 Wh	5 - 7 h	Requiere modulo boost 5 V; no recomendada uso continuo

Tabla 10. Posibles soluciones de autonomía

Una mejora futura orientada a reducir el consumo sería activar el modo light-sleep del ESP32 entre ciclos de lectura de sensores (cada 5 segundos), lo que podría bajar el consumo del microcontrolador durante el periodo de espera, reduciendo el consumo total del sistema.

6.4 EVALUACIÓN TÉCNICA Y ECONÓMICA

Una vez validado el funcionamiento del sistema en simulación y analizados su consumo energético y su autonomía, este apartado aborda la evaluación técnica y económica de la solución a partir de los elementos finalmente integrados en el proyecto. Se desarrolla en tres bloques: el análisis de costes de construcción y operación del prototipo, la estimación de su rendimiento productivo y del coste por unidad producida, y el estudio de la viabilidad de escalar el diseño modular a aplicaciones comerciales.

6.4.1 ANÁLISIS DE COSTES

El coste del prototipo se descompone en dos partidas: la inversión inicial de construcción (CAPEX) y el coste recurrente de operación (OPEX). La inversión inicial reúne, por una parte, la electrónica de control y sensores, el sistema hidráulico y los consumibles eléctricos,

cuyo desglose de costes reales, se recoge en la tabla siguiente y la estructura física de la torre, fabricada mediante impresión 3D, cuyo coste se estima a continuación.

Componente	Precio (€)
Microcontrolador ESP32 DevKit V1	7
Sensor temperatura agua DS18B20	4,5
Sensor temperatura/humedad aire DHT22	3,3
Sensor pH PH-4502C	18
Sensor conductividad/TDS analógico	6
Sensor calidad de aire MQ- 135	6
Sensor de nivel de agua	2
Sensor de consumo INA219	2
Módulo relé 1 canal 5 V	2
Bomba sumergible 5 V	10
Pantalla LCD 20x4 I2C	12

Fuente de alimentación 5 V / 3 A	10
LEDs de alerta + resistencias	3
Cableado, conectores y protoboard/PCB	10
Tubería y accesorios de riego	5
Total electrónica + hidráulica (€)	100,8

Tabla 11. Desglose de costes reales de los componentes electrónica+ hidráulica

La estructura física del prototipo se fabricaría mediante impresión 3D en filamento PETG. Se elige PETG porque es un material aprobado por la FDA (Agencia estadounidense para la regulación de alimentos, medicamentos y cosmética) para el uso alimentario además de que es resistente mecánicamente, frente a químicos y temperatura. [29] A partir del volumen real de cada pieza se estima el material necesario, con densidad de 1,27 g/cm³ [30] y un 8 % de sobre coste por soportes y purga, y suponiendo un precio de filamento PETG de unos 18 €/kg.

Pieza	Volumen (cm ³)	Masa PETG (g)	Coste material (€)	Cantidad
Depósito	121	166	3,0	1
Tapa final	167	229	4,1	1

Módulo de cultivo	219	300	5,4	1 – 5
Unión / tapa de módulo	69	95	1,7	1 por módulo

Tabla 12. Coste de material de la estructura por pieza por impresión PETG

Dado el carácter modular de la torre, el depósito y la tapa final son piezas únicas, mientras que cada módulo y su unión se repiten dependiendo de la altura deseada. El coste de material para las configuraciones que se suponen más habituales se muestran en la Tabla 13.

Configuración	Coste estructura (€)	Coste prototipo (€)
1 Módulo	14	114,8
3 Módulos	28	128,8
5 Módulos	43	143,8

Tabla 13. Coste de filamento de la estructura según configuración

El coste total del prototipo depende del número de módulos de la torre, situándose entre unos 115 euros para una configuración de una planta y unos 144 euros para cinco plantas. Para una eventual producción en serie, la impresión 3D propia deja de ser eficiente y conviene valorar la fabricación industrial. La inyección de plástico reduce mucho el coste por pieza, pero exige una elevada inversión en moldes que solo se justifica a partir de miles de unidades. [31]

El coste de operación se ha refinado respecto a la estimación preliminar empleando el consumo eléctrico real del sistema con las especificaciones de los componentes finales. Con un consumo medio de 3,25 W en funcionamiento continuo, el sistema consume aproximadamente 2,34 kWh al mes. Aplicando una tarifa eléctrica de 0,15 €/kWh, el coste eléctrico mensual resulta de 0,35 €, inferior a la estimación preliminar y prácticamente

despreciable frente al resto de consumibles. La partida dominante del coste operativo es la solución nutritiva, seguida de las semillas y la reposición de agua que dependerá de los módulos. Se hace una estimación del coste para un consumo mensual de un prototipo de tres módulos en la Tabla 14.

Consumos	Coste mensual (€)
Consumo eléctrico	0,35
Reposición de agua	1
Solución nutritiva	4
Semillas y reposición menor	2
Total mensual estimado (€)	7,35

Tabla 14. Coste de operación mensual del prototipo de tres módulos

6.4.2 ESTIMACIÓN DE RENDIMIENTO

Para valorar la eficiencia económica hay que estimar cuánto produce el sistema. Como la torre es modular, el rendimiento se expresa por módulo y escala con la configuración que elija el usuario: cada módulo tiene 3 huecos de cultivo y la torre admite entre 1 y 5 módulos, es decir, de 3 a 15 lechugas. Con un peso medio de 250 g por lechuga y un ciclo de unos 35 días con plantación escalonada [32], cada módulo da del orden de 0,64 kg al mes ($3 \text{ lechugas} \times 0,25 \text{ kg} \times 30/35$). Al ser una disposición vertical, cuantas más plantas se añaden, más se produce por superficie ocupada.

Configuración	Nº lechugas	Producción (kg/mes)	Rendimiento (kg/m ² /mes)
1 módulo	3	0,64	2,6
3 módulos	9	1,93	7,7
5 módulos	15	3,21	12,9

Tabla 15. Producción y rendimiento según el número de plantas

A partir de la producción anterior puede calcularse el coste por kilogramo de lechuga, que es el indicador que permite compararla con el precio de compra. Hay que tener en cuenta que el coste de operación mensual (OPEX) no es fijo, sino que depende del número de plantas: el gasto en electricidad y agua es prácticamente constante (1,35 €/mes), mientras que el de consumibles (sustrato, solución nutritiva y semillas) crece con el número de lechugas (0,67 €/lechuga al mes). Tomando como referencia una torre de tres módulos (7,35 €/mes), el coste por kilogramo se obtiene dividiendo el OPEX entre la producción.

Configuración	Producción (kg/mes)	OPEX (€/mes)	Coste operativo (€/kg)
1 módulo	0,64	3,35	5,2
3 módulos	1,93	7,35	3,8
5 módulos	3,21	11,35	3,5

Tabla 16. Coste por unidad producida (€/kg) según configuración

El coste operativo por kilogramo disminuye al llenar la torre, porque el gasto fijo se reparte entre más lechugas: pasa de unos 5,2 €/kg con una sola planta a unos 3,5 €/kg con cinco, situándose por debajo del precio de mercado de la lechuga de entorno a 4 €/kg. Por tanto, la rentabilidad depende de aprovechar toda la capacidad de la torre: con pocas plantas su valor

es sobre todo educativo y de autoconsumo, mientras que con la torre llena la producción resulta competitiva frente a la compra, lo que puede justificar el estudio de escalabilidad a nivel industrial.

6.4.3 ESTUDIO DE ESCALABILIDAD INDUSTRIAL

El prototipo doméstico, concebido como una torre compacta, no es la geometría óptima para una explotación comercial: ampliar su altura está limitado por la estabilidad y por la capacidad de elevación de la bomba de 5 V, además de su pequeño depósito que obligaría a reposiciones frecuentes. Por ello, para aplicaciones de mayor escala se propone rediseñar la solución como un sistema modular basado en un tipo de módulo: una balda con canal NFT idéntica y repetible. La clave del planteamiento es la capacidad de la instalación que se ajusta apilando módulos, de modo que lo único que varía es la altura de la estantería, mientras la huella en el suelo permanece constante. Cada módulo integra su canal, su barra de iluminación y sensores, además comparte el núcleo de control basado en ESP32, el depósito y la bomba de la columna.

Para dimensionar el módulo se parte de datos de producción de cultivo hidropónico que en sistemas NFT la densidad típica es del orden de 20–25 lechugas por m² de canal [32] y se supone los mismos datos del prototipo de ciclo de cultivo de unos 35 días y un peso medio de 0,25 kg por unidad. Tomando un área de canal de aproximadamente 1,5 m² por módulo y una densidad de 22 lechugas/m², cada módulo produce del orden de 86 kg/año. La unidad de dimensionamiento deja de ser la superficie de suelo y pasa a ser el número de módulos apilados, según se recoge en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia..** El escalado vertical tiene, un límite físico ya que un local de altura estándar cabría del orden de 5–6 módulos por columna. Cuando la demanda supera esa altura útil, la capacidad no se amplía introduciendo un módulo o una estantería diferente, sino replicando la misma columna de módulos en paralelo.

Parámetro	Valor
Largo	2 m
Ancho	0,75 m
Alto	0,35 m
Área de cultivo	1,5 m ²
Capacidad	33 lechugas (22 uds/ m ²)

Tabla 17. Parámetros modulo industrial

Consumo mensual (kg/mes)	Consumo anual (kg/año)	Nº de Módulos	Producción (kg)
30	360	5	430
50	600	7	600
80	960	12	1030

Tabla 18. Escenarios de Producción y número de módulos necesarios

Para realizar una valoración del retorno de la inversión es necesario estimar previamente el coste de la instalación. Dado que el sistema se concibe como una repetición de un único módulo, el coste se estructura en dos niveles. Por un lado, el coste del módulo, que agrupa los componentes que se replican con cada balda que se apila y que se multiplica por el número de módulos de la instalación. Por otro lado, el coste del núcleo compartido, que reúne los elementos comunes a toda una columna y que no se duplican al añadir baldas. De este modo, la inversión de cualquier configuración se obtiene sumando un único núcleo por columna al coste de tantos módulos como se apilen, lo que permite escalar el presupuesto de forma directa y proporcional a la producción deseada. Los precios que se recogen en las

siguientes tablas son orientativos, correspondientes a componentes de electrónica y de hidroponía de consumo, y bastan para dimensionar el retorno de la inversión con un orden de magnitud realista.

Componente Módulo	Precio estimado (€)
Canal NFT PVC alimentario	50
Barra LED horticultura	30
Vasos de cultivo	7
Estructura/soporte de la balda	45
Fontanería del módulo	15
Subtotal por módulo	147

Tabla 19. Componentes del Módulo

Componentes Núcleo	Precio estimado (€)
Microcontrolador	10
Sensor de pH	20
Sensor TDS	6
Sensores Temperatura y humedad	8
Sensor Calidad aire	6
Sensor Nivel de agua	2
Sensor Consumo	2
Bombas peristálticas	60
Bomba de recirculación	20
Depósito	35
Relés y fuente de alimentación	20
Cableado, Leds y PCBs	10
Subtotal núcleo por columna (€)	199

Tabla 20. Componentes núcleo compartido columna

Con estos costes unitarios, la inversión de cualquier instalación se obtiene sumando un único núcleo compartido por columna (199 €) al coste de tantos módulos como se apilen (147 € cada uno). El segundo elemento necesario para el retorno es el coste operativo, entendido como el gasto anual de mantener el sistema en funcionamiento, que procede fundamentalmente del consumo eléctrico y de los consumibles (nutrientes, agua y plántulas). La iluminación con una barra LED de unos 40 W encendida 16 h al día consume del orden

de 0,64 kWh diarios que son unos 233 kWh al año, que a un precio de 0,15 €/kWh equivalen a unos 35 € anuales. Añadiendo el coste anterior al coste de los consumibles se estima en torno a 43 €/año el coste operativo por módulo. La bomba de recirculación, al ser un elemento del núcleo compartido, se contabiliza aparte: con una potencia aproximada de 20 W en funcionamiento continuo supone unos 175 kWh anuales, es decir, alrededor de 26 €/año por columna. De este modo, el coste operativo de cada configuración resulta de sumar 43 € por módulo y 26 € por cada columna instalada.

Configuración	Inversión (€)	Producción (kg)	Ahorro bruto (€)	Coste operativo (€)	Ahorro neto anual (€)	ROI
5 módulos	934	430	1720	241	1479	0,6 años
7 módulos	1.228	600	2400	327	2073	0,6 años
12 módulos	2.162	1030	4120	568	3552	0,6 años

Tabla 21. Estimación del ROI en diferentes escenarios de producción

A modo de ejemplo, para la configuración de 5 módulos la inversión es de $199 + 5 \times 147 = 934$ €, el ahorro bruto de $430 \text{ kg} \times 4 \text{ €/kg} = 1.720$ €, el coste operativo de $5 \times 43 + 26 = 241$ € y daría un ahorro neto anual de 1479 €, lo que arroja un periodo de recuperación en torno a los ocho meses. Conviene interpretar esta cifra con cautela: refleja únicamente la inversión en materiales y excluye la mano de obra, que constituye el coste real más importante de una explotación de este tipo. Si se incorporan la mano de obra de trasplante, cosecha y limpieza, el equipamiento de grado comercial y la infraestructura del local, el retorno realista se alarga hasta el orden de dos o tres años. En otras palabras, el sistema es barato de construir, pero su rentabilidad la determina la operación.

En efecto, la viabilidad de una explotación comercial no depende tanto de la inversión inicial como de una serie de cuellos de botella del proceso productivo que es necesario resolver. El más determinante es la mano de obra, las tareas de trasplante, cosecha, limpieza y la calibración no se automatizan con el diseño actual ni escalan de forma proporcional al número de módulos, por lo que constituyen el principal factor de coste y la mayor incertidumbre del retorno. A ello se suma el suministro de plántulas, ya que una producción continua exige una zona de germinación dedicada y un semillero escalonado que marca el ritmo máximo de cosecha.

En el plano técnico, la corrección automática de nutrientes y pH se convierte en un requisito y deja de ser una mejora opcional, pues a escala industrial la corrección manual resulta inviable y obliga a incorporar la dosificación mediante bombas peristálticas. En la misma línea, la calibración y el mantenimiento de sensores adquieren un peso relevante: las sondas de pH y TDS sufren deriva y el sensor de calidad de aire requiere precalentamiento, [33] [34] de modo que, multiplicado por muchos módulos, el mantenimiento supone una carga de trabajo considerable. La iluminación en interior plantea un compromiso adicional, ya que en instalaciones sin luz natural los paneles LED dominan tanto el consumo como la inversión, por lo que conviene priorizar la luz natural mediante cubiertas o invernadero siempre que sea posible.

Por último, dos condicionantes de carácter transversal completan el análisis. La inocuidad alimentaria y la normativa obligan, al servir producto en un entorno comercial, a cumplir los requisitos de seguridad alimentaria y de control del agua basado en el APPCC. [35] Y el escalado de la arquitectura IoT exige, para gestionar un número elevado de módulos, un broker MQTT local y robusto, un panel que agregue todas las unidades y mecanismos de redundancia ante fallos.

En conjunto, el sistema es plenamente viable a escala doméstica como demostrador y solución de autoconsumo, y su rediseño en torno a un módulo NFT único y repetible ofrece un camino de escalado sencillo de fabricar y dimensionable de forma directa por número de módulos. La inversión en materiales es reducida y se recupera con rapidez, sin embargo,

queda condicionada por la mano de obra, la dosificación automática y el control sanitario, que son los verdaderos cuellos de botella a resolver antes de una explotación comercial.

Capítulo 7. CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

El proyecto ha permitido diseñar, implementar y validar en un entorno de simulación un sistema de cultivo hidropónico vertical de bajo coste basado en una solución IoT. Partiendo de un microcontrolador ESP32, se ha desarrollado una solución completa que integra la monitorización de las variables críticas del cultivo (temperatura del aire y de la solución, humedad, pH, conductividad eléctrica, nivel de agua, calidad del aire y consumo eléctrico), una máquina de estados que gobierna el ciclo de riego y la gestión de alertas, una lógica de validación de medidas y umbrales, y un panel de monitorización remota a través del protocolo MQTT. El conjunto se ha verificado en el simulador Wokwi integrado con PlatformIO y Visual Studio Code, comprobando el correcto funcionamiento de los siete estados, sus transiciones y el comportamiento ante escenarios críticos como el nivel de agua bajo.

En cuanto a los objetivos, se han cumplido de forma satisfactoria. Se ha diseñado una solución sencilla, práctica y accesible para el hogar, con un coste de construcción de entre 115 y 144 euros según el número de módulos y un gasto de operación de unos 7 euros al mes para una torre de tres módulos, cifras que confirman su viabilidad para el autoconsumo a pequeña escala. Se ha definido una interfaz IoT que informa al usuario en tiempo real, se ha cuidado el bajo consumo y la modularidad, y se ha analizado la viabilidad técnica, económica y ambiental, incluido un primer estudio de escalado industrial. El proyecto encaja, además, con varios Objetivos de Desarrollo Sostenible ligados a la producción responsable, la innovación y las ciudades sostenibles.

Entre las principales aportaciones del trabajo destacan la definición de una arquitectura de control y comunicación modular y reutilizable, la validación de la lógica de control sin necesidad de hardware físico (lo que reduce el coste y el riesgo de las primeras fases de desarrollo) y un estudio de escalabilidad que apunta a un periodo de recuperación de la inversión de en torno a 2,5 a 3 años en escenarios comerciales. Estas aportaciones sientan una base sólida para continuar el desarrollo del sistema a nivel industrial.

No obstante, conviene reconocer las limitaciones del trabajo. La validación se ha realizado en simulación, por lo que no reproduce el ruido de los sensores analógicos reales, los efectos eléctricos de los actuadores ni la dinámica hidráulica del cultivo. Estas limitaciones, lejos de invalidar los resultados, delimitan con precisión el camino a seguir y motivan las líneas de trabajo futuro que se describen a continuación.

7.1 TRABAJOS FUTUROS

A partir del sistema diseñado y validado en simulación, se identifican varias líneas de trabajo futuro orientadas a llevar la propuesta desde el demostrador actual hasta una solución plenamente funcional y con potencial a un desarrollo de explotación de carácter industrial. Estas líneas se han ordenado siguiendo una lógica de madurez creciente, desde la construcción del prototipo físico hasta la incorporación de técnicas avanzadas de gestión y analítica.

7.1.1 DESARROLLO DE UN PROTOTIPO FÍSICO FUNCIONAL

La construcción de un prototipo físico de la torre con un ESP32 real y el conjunto de sensores y actuadores seleccionados. Esta fase permitirá contrastar la lógica de control ya validada en simulación frente al comportamiento del hardware real y abordar directamente las cuatro limitaciones identificadas en el análisis de resultados. En concreto, será necesario calibrar las sondas de pH y conductividad, caracterizar el ruido de conversión del convertidor analógico-digital, medir el consumo eléctrico real mediante el sensor de consumo, evaluar el pico de corriente en el arranque de la bomba y su efecto sobre la línea de alimentación, y ejecutar ciclos de riego reales con los tiempos de producción del orden de 5 minutos encendida y 25 minutos apagada. Idealmente, el prototipo debería completar al menos un ciclo de cultivo completo de lechuga (aproximadamente 35 días) para validar de forma empírica el rendimiento estimado.

7.1.2 INCORPORACIÓN DE ACTUADORES PARA CERRAR EL LAZO DE CONTROL

En la configuración actual el sistema incorpora un único actuador, la bomba de agua, por lo que el control se limita a la gestión del riego y a la generación de alertas. Una línea de mejora natural y de alto valor consiste en incorporar nuevos actuadores que permitan pasar de un sistema de monitorización con alertas a un sistema de control en lazo cerrado. Entre los elementos a añadir destacan las bombas peristálticas de dosificación para la corrección automática de nutrientes y del pH, la iluminación LED hortícola controlable para el cultivo en interior sin luz natural, la ventilación o extracción para regular la temperatura y la concentración de CO₂, las electroválvulas para la reposición automática del agua y un aireador para mantener un nivel adecuado de oxígeno disuelto en la solución.

Sobre estos actuadores podría implementarse una estrategia de control más sofisticada que la actual basada en umbrales, por ejemplo, un control PID (proporcional, integral y derivativo). En cuanto a la iluminación, conviene dimensionarla a partir de la integral diaria de luz recomendada para la lechuga, que se sitúa de forma general entre 14 y 17 mol por metro cuadrado y día, si bien algunos estudios en sistemas verticales obtienen buenos resultados con valores cercanos a 11,5 mol por metro cuadrado y día y una densidad de flujo fotónico fotosintético de unos 200 micromol por metro cuadrado y segundo durante un fotoperiodo de 16 horas. [36] La corrección automática de pH y nutrientes mediante bombas peristálticas es un requisito prácticamente imprescindible para cualquier escalado, ya que la corrección manual resulta inviable a partir de cierto número de módulos.

7.1.3 EVOLUCIÓN HACIA UN PROTOTIPO INDUSTRIAL

La geometría de torre compacta no es la óptima para una explotación comercial. Una línea de trabajo de mayor alcance consiste en evolucionar el diseño hacia una estantería de tipo NFT como se ha estudiado en la sección 6.4.3. Para esta versión industrial deberían emplearse materiales aptos para el contacto con agua y, preferiblemente, para el contacto alimentario, como el PETG en las piezas impresas en 3D, e incorporar una zona de germinación y un semillero escalonado que permita una producción continua. El carácter

modular de la arquitectura facilita la replicación de unidades para cubrir la superficie disponible.

Este escalado introduce además requisitos específicos que deberían estudiarse en detalle como la automatización de tareas de mano de obra (trasplante, cosecha, limpieza y calibración), la corrección automática de nutrientes y pH a escala, el mantenimiento y la calibración periódica de un número elevado de sondas, la gestión del consumo de la iluminación artificial y el cumplimiento de la normativa de seguridad alimentaria y de control del agua mediante un sistema de Análisis de Peligros y Puntos de Control Crítico (APPCC), imprescindible para comercializar el producto.

7.1.4 ESCALADO DE LA ARQUITECTURA IOT

El paso de un único modulo domestico a una instalación con múltiples unidades exige reforzar la arquitectura de comunicaciones. Se propone migrar del broker MQTT público utilizado en la simulación (HiveMQ) a un broker local desplegado en la propia instalación, como Mosquitto, que ofrece una huella de recursos mínima y resulta idóneo para entornos de computación en el borde. [37] De forma complementaria, la gestión de un parque amplio de dispositivos ESP32 hace recomendable implementar actualizaciones de firmware en remoto (Over-The-Air, OTA). [38] El ESP32 admite este mecanismo mediante un esquema de doble partición de aplicación y una partición de datos que registra cual esta activa, lo que permite escribir y verificar el nuevo firmware antes de reiniciar y habilita la vuelta atrás en caso de fallo. [39] Disponer de OTA evita el mantenimiento manual de cada nodo y facilita el despliegue de mejoras y parches de seguridad de forma centralizada.

7.1.5 OPTIMIZACIÓN ENERGÉTICA Y AUTONOMÍA

Aunque el sistema se ha concebido como una solución de bajo consumo, existe margen para mejorar su eficiencia y su autonomía. En los módulos cuya función es esencialmente de medida podría aprovecharse el modo de sueño profundo (deep sleep) del ESP32, que reduce el consumo del microcontrolador a unos pocos microamperios entre lecturas, prolongando notablemente la duración de la batería. Para instalaciones situadas en exteriores o sin acceso

cómodo a la red eléctrica, resulta de interés alimentar los nodos mediante un pequeño panel solar y una batería, dimensionando el panel con un margen suficiente (del orden de tres veces el consumo diario) para garantizar el funcionamiento durante periodos de baja insolación. Esta línea refuerza el carácter sostenible del proyecto y amplía su rango de despliegue.

7.1.6 MONITORIZACIÓN INTELIGENTE CON VISIÓN COMPUTACIONAL Y APRENDIZAJE AUTOMÁTICO

Una línea de evolución más ambiciosa consiste en incorporar una cámara y modelos de aprendizaje automático para enriquecer la monitorización del cultivo. Mediante estos componentes es posible estimar de forma no destructiva la biomasa o el peso fresco de la lechuga, detectar deficiencias nutricionales y enfermedades, predecir el rendimiento y el momento óptimo de cosecha, e identificar anomalías en el desarrollo de la planta. [40] La integración de estas capacidades permitiría pasar de un mantenimiento reactivo a uno predictivo y avanzar hacia la automatización de decisiones agronómicas, aprovechando la información ya recopilada por la red de sensores.

Ahora bien, el procesamiento de imágenes y la ejecución de modelos de aprendizaje profundo exigen una capacidad de cómputo muy superior a la que ofrece el ESP32, cuyo microcontrolador está orientado al control de sensores y actuadores en tiempo real, no al procesamiento intensivo de datos. Por ello, esta línea implicaría incorporar una placa de mayor potencia, como una Raspberry Pi, encargada de gestionar la cámara y de ejecutar los modelos de visión, mientras el ESP32 se mantiene dedicado a la adquisición de medidas y al gobierno de los actuadores. De este modo se establece una arquitectura de dos niveles en la que cada dispositivo asume la tarea para la que está mejor preparado.

7.1.7 MEJORAS INTERFAZ DE USUARIO

Por último, se identifican otras líneas complementarias orientadas a mejorar la experiencia del usuario a través de la aplicación web y móvil. En primer lugar, el desarrollo de una aplicación móvil nativa, distribuida a través de App Store y Google Play, que incorpore notificaciones automáticas para avisar al usuario ante cualquier incidencia o umbral crítico.

A ello se sumaría el almacenamiento histórico de las medidas en una base de datos, que permitiría realizar analítica de tendencias y anticipar las necesidades del cultivo a partir de su evolución. Más allá de la interfaz, estas mejoras abren la puerta a dos líneas de trabajo adicionales: la ampliación del estudio agronómico a otros cultivos de hoja, aromáticos o de fruto, como la albahaca o la fresa, que permitiría validar la versatilidad del sistema; y la realización de un análisis de ciclo de vida que cuantifique con rigor el impacto ambiental de la solución y respalde sus credenciales de sostenibilidad.

Capítulo 8. BIBLIOGRAFÍA

- [1] J. Baras y J. Dávila, «A review of hydroponics and conventional agriculture based on sustainability and productivity indicators. *Energies*, 16(4), 1690,» 2023. [En línea]. Available: <https://www.mdpi.com/1996-1073/16/4/1690#:~:text=The%20review%20results%20showed%20that,water%20consumption%20reduction%2C%20and%20conservation..>
- [2] F. Orsini, «How much food can we grow in urban areas? A global meta-analysis. *Environmental Research Letters*, 17(9), 094003.,» 2022. [En línea]. Available: <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC9540868/>.
- [3] A. S. T. y. D. J. Wetherall, *Computer Networks*, 5.^a ed. Upper Saddle River, NJ: Pearson Prentice Hall, 2011.
- [4] OASIS, «MQTT Version 5.0. OASIS Standard,» 2019. [En línea]. Available: <https://docs.oasis-open.org/mqtt/mqtt/v5.0/mqtt-v5.0.html..>
- [5] Iberdrola, «Qué es la hidroponía y sus ventajas. Iberdrola.,» [En línea]. Available: <https://www.iberdrola.com/sostenibilidad/que-es-hidroponia-y-ventajas>.
- [6] verdegén, «Tipos de sistemas hidropónicos para cultivar,» 2017. [En línea]. Available: <https://generacionverde.com/blog/hidroponia/tipos-de-sistemas-hidroponicos/>.
- [7] S. A. L. Ortiz, J. G. V. Luzuriaga, F. Gunzha, E. Freire y M. Pujos, «(2022). Automatización del control de nutrientes en hidroponía mediante el uso de un sistema embebido. *Polo del Conocimiento: Revista científico-profesional*, 7(7), 814-826.,» [En línea].

- [8] PlatformIO, «PlatformIO: A professional collaborative platform for embedded development,» [En línea]. Available: <https://platformio.org/>.
- [9] Wokwi, «Wokwi — Online Arduino, ESP32 & STM32 Simulator,» [En línea]. Available: <https://wokwi.com/>.
- [10] «Smart Garden, Huerto Inteligente de Interior 10 Casquillos Smart Herb Garden Kit para Interiores, jardín Interior con luz LED de Crecimiento de 24 W, Altura Ajustable (A) ,» [En línea]. Available: https://www.amazon.es/Dynaecuty-Inteligente-Casquillos-Interiores-Crecimiento/dp/B0FHQCMTMT/ref=sr_1_33?c=ts&dib=eyJ2IjoiMSJ9.FYd_s5ysxAyENJlj-WK9Zu8xCfSvGEt8xsGAG2NLs6aDrYV6CTYfZHlyIgmGmOitmy1l-0JfnkohYRLAiYfof-PbKLNA8Dqe9M331T1DNGyxu981f5SyNqxrSwLLrl5kKt.
- [11] «Sistema hidropónico de cultivo hidropónico, torre, jardín, torre, interior, balcón, 30 agujeros, 6 niveles, depósito de agua de 10 litros, ahorra espacio (gris),» [En línea]. Available: https://www.amazon.es/panfudongk-hidrop%C3%B3nico-interior-agujeros-dep%C3%B3sito/dp/B0F9PCXYCC/ref=sr_1_42?c=ts&dib=eyJ2IjoiMSJ9.FYd_s5ysxAyENJlj-WK9Zu8xCfSvGEt8xsGAG2NLs6aDrYV6CTYfZHlyIgmGmOitmy1l-0JfnkohYRLAiYfof-PbKLNA8Dqe9M331T1DNGyxu981f5SyNqxrSwLLr.
- [12] «Armario de cultivo hidropónico con LED, 0,77x0,4x1,7m, Blanco,» [En línea]. Available: <https://dancovershop.com/es-es/products/armario-de-cultivo-hidrop-nico-con-led-0-77x0-4x1-7m-blanco>.
- [13] «Sistema de cultivo hidropónico, sistema de jardinería hidropónico con 108 espacios para plantas, 3 capas, kit de cultivo hidropónico, para hierbas, frutas y verduras, tubos de PVC de grado,» [En línea]. Available: https://www.amazon.es/JUUTALK-hidrop%C3%B3nico-jardiner%C3%ADa-espacios-verduras/dp/B0FQJNF1S9/ref=sr_1_36_sspa?__mk_es_ES=%C3%85M%C3%85%C

5%BD%C3%95%C3%91&crd=1NKPPX2SA8GXD&dib=eyJ2IjoiMSJ9.rqTnYj7E
StBKgRt4eLwd3kRO8K7W9f-pH6nz7NAC68xJPWX4-3l-r1gumfPOLcgG.

- [14] GroHo, «Elegir sistemas hidropónicos,» [En línea]. Available: <https://www.groho.es/post/elegir-sistemas-hidroponicos>.
- [15] H. Environment, «Cultivo de Lechuga Hidropónica: Guía Completa desde la Siembra,» [En línea]. Available: <https://hydroenv.com.mx/cultivo-de-lechuga-hidroponica-guia-completa-desde-la-siembra/>.
- [16] Miilkia, «Guía paso a paso para cultivar lechuga hidropónicamente,» [En línea]. Available: <https://www.miilkiagrow.com/es/news/step-by-step-guide-to-growing-lettuce-hydroponically/>.
- [17] archipelagourbanfarms, «Modular Hydroponic System,» [En línea]. Available: <https://www.thingiverse.com/thing:2403922#Print%20Settings>.
- [18] naylampmechatronics, «Tutorial sensor digital de temperatura DS18B20,» [En línea]. Available: https://naylampmechatronics.com/blog/46_tutorial-sensor-digital-de-temperatura-ds18b20.html.
- [19] Programarfacil, «Cómo utilizar el sensor DHT11 para medir la temperatura y humedad con Arduino,» [En línea]. Available: <https://programarfacil.com/blog/arduino-blog/sensor-dht11-temperatura-humedad-arduino/>.
- [20] T. electronics, «¿Como usar modulo PH-4502 con arduino?,» [En línea]. Available: <https://www.taloselectronics.com/blogs/tutoriales/como-usar-modulo-ph-4502-con-arduino>.
- [21] «Arduino with TDS Sensor (Water Quality Sensor),» Random nerd tutorials, [En línea]. Available: <https://randomnerdtutorials.com/arduino-tds-water-quality-sensor/>.

- [22] M. Alam, «TDS Sensor & Arduino Interfacing for Water Quality Monitoring,» how2electronics, [En línea]. Available: <https://how2electronics.com/tds-sensor-arduino-interfacing-water-quality-monitoring/>.
- [23] «MQ135 Air Quality Sensor : Pin Configuration, Working & Its Applications,» Elprocus, [En línea]. Available: <https://www.elprocus.com/mq135-air-quality-sensor/#:~:text=An%20MQ135%20air%20quality%20sensor%20is%20one%20type%20of%20MQ,5V%20supply%20with%20150mA%20consumption..>
- [24] «Arduino And MQ 135 Gas Sensor With Arduino Code,» Arduino, [En línea]. Available: https://projecthub.arduino.cc/m_karim02/arduino-and-mq-135-gas-sensor-with-arduino-code-0385af.
- [25] A. Arduino, «Sensor Detección de Agua para Arduino,» [En línea]. Available: <https://aprendiendoarduino.wordpress.com/2018/10/17/sensor-deteccion-de-agua-para-arduino/>.
- [26] E. O. Bit, «Sensor de agua,» [En línea]. Available: <https://eloctavobit.com/modulos-sensores/sensor-de-agua>.
- [27] Programarfacil, «INA219 mide el consumo de tus proyectos con Arduino,» [En línea]. Available: <https://programarfacil.com/blog/arduino-blog/sensor-ina219-arduino-esp8266-esp32/>.
- [28] Amazon, «Mini bomba de agua sumergible USB (CC 5 V 1 – 3 W 200 L/H) ajustable, ultra silenciosa, pequeña bomba para fuente de mascotas, pecera de acuario, estanque, hidropónico, interior o exterior,» [En línea]. Available: <https://www.amazon.es/sumergible-ajustable-silenciosa-mascotas-hidrop%C3%B3nico/dp/B0B24G8WP7>.

- [29] 3Dprintfilam, «Filamento PETG Smartfil,» [En línea]. Available: <https://3dprintfilam.com/producto/filamento-petg-smartfil-2/>.
- [30] Filament2print, «Petg vs Pla,» [En línea]. Available: <https://filament2print.com/es/blog/petg-vs-pla>.
- [31] Plastic85, «De prototipo a producción masiva con inyección de plástico,» [En línea]. Available: <https://plastic85.com/produccion-masiva-con-inyeccion-de-plastico/>.
- [32] Cfgreenway, «NFT Hydroponics: The Fast-Track To Profitable,» [En línea]. Available: <https://cfgreenway.com/nft-hydroponics-the-fast-track-to-profitable-leafy-green-farming/>.
- [33] Nidopro, «Sonda pH: guía práctica para mantenerla siempre precisa y eficiente,» [En línea]. Available: <https://www.nidopro.com/es/sonda-ph/>.
- [34] Leantec, «Módulo Sensor de Calidad del Aire MQ-135 para Arduino y Proyectos de Electrónica,» [En línea]. Available: <https://leantec.es/tienda/mq135-mq-135-sensor-air-quality-sensor-hazardous-gas-detection-module-arduino/>.
- [35] Aesan, «Flexibilidad en la aplicación del sistema basado en los principios del APPCC,» [En línea]. Available: https://www.aesan.gob.es/AECOSAN/web/seguridad_alimentaria/ampliacion/flexibilidad_appcc.htm.
- [36] K. P. Gavhane, M. Hasan, D. K. Singh, S. N. Kumar, R. N. Sahoo y W. Alam, «Determination of optimal daily light integral (DLI) for indoor cultivation of iceberg lettuce in an indigenous vertical hydroponic system,» [En línea]. Available: <https://www.nature.com/articles/s41598-023-36997-2>.
- [37] Mosquitto, «Eclipse Mosquitto,» [En línea]. Available: <https://mosquitto.org/>.

- [38] Benq, «OTA(Over-the-air) Introducción,» [En línea]. Available: <https://www.benq.eu/es-es/business/resource/trends/ota-over-the-air-introduction.html>.
- [39] W. Johnson, «ESP32 OTA and Rollbacks - What happens under the hood?,» [En línea]. Available: https://blog.waynejohnson.net/doku.php/esp32_ota.
- [40] J.-S. G. Kim, S. Moon, J. Park, T. Kim y S. Chung, «Development of a machine vision-based weight prediction system of butterhead lettuce (*Lactuca sativa* L.) using deep learning models for industrial plant factory,» [En línea]. Available: <https://www.frontiersin.org/journals/plant-science/articles/10.3389/fpls.2024.1365266/full>.

ANEXO I-ODS

Este proyecto se compromete con los siguientes objetivos de desarrollo sostenible (ODS). Para cada uno se explica de qué manera concreta el sistema desarrollado contribuye a alcanzarlo.

- **ODS 3 - Salud y Bienestar**

La torre produce verdura fresca en la propia vivienda sin pesticidas ni herbicidas, y al cultivar sin suelo se evita el contacto de la lechuga con tierras que puedan estar contaminadas. Tener la cosecha a mano anima a comer más hortalizas de temporada y reduce la exposición a los residuos químicos habituales en la agricultura convencional, lo que repercute directamente en una alimentación más sana.

- **ODS 8 - Trabajo decente y crecimiento económico**

El estudio de escalabilidad plantea un modelo replicable por módulos que puede crecer hasta una pequeña explotación comercial con una inversión contenida. El análisis de costes, rendimiento y retorno de la inversión muestra que el sistema puede sostener una actividad económica local en torno al cultivo urbano, generando empleo ligado a la producción, el mantenimiento y la distribución de alimentos de proximidad.

- **ODS 9 - Industria, Innovación e Infraestructura**

El proyecto reúne IoT, control embebido y fabricación aditiva en una solución de bajo coste. Al apoyarse en hardware y software abiertos, como el ESP32, MQTT o PlatformIO, cualquiera puede reproducir el diseño, adaptarlo y mejorarlo sin licencias caras. Es, en definitiva, un ejemplo de cómo la tecnología accesible permite modernizar un sector tradicional como el agrícola.

- **ODS 11 - Ciudades y Comunidades sostenibles**

El sistema está pensado para balcones, terrazas e interiores, aprovechando la altura en viviendas donde el espacio escasea. Al producir alimentos dentro de la ciudad, acerca la cosecha al consumidor y reduce la dependencia del transporte desde el campo, uno de los factores que más presionan la logística y la contaminación urbanas.

- **ODS 12 - Producción y Consumo responsables**

La recirculación del agua y el ajuste de los nutrientes a partir de los sensores reducen el desperdicio de recursos. La medición del consumo eléctrico con el INA219 permite conocer y optimizar el gasto energético, y la estructura se imprime en PETG, un material reciclable y apto para el contacto alimentario. El resultado es un uso más medido de la energía, el agua y los materiales.

- **ODS 13 - Acción por el clima**

Al recortar el consumo de agua hasta un 95 % y acortar la cadena de transporte, el sistema rebaja la huella asociada a producir y distribuir alimentos. El bajo consumo eléctrico del prototipo y las mejoras previstas, como el modo de bajo consumo del ESP32 entre lecturas, apuntan en la misma dirección de reducir emisiones.

- **ODS 15 - Vida de ecosistemas terrestres**

Cultivar sin suelo alivia la presión sobre la tierra de labor y evita el vertido de fertilizantes y pesticidas que degradan los ecosistemas. Necesitar menos superficie agrícola para obtener la misma cantidad de alimento se traduce en menos deforestación y menos erosión del terreno, lo que ayuda a conservar la vida de los ecosistemas terrestres.

ANEXO II-ESTRUCTURA [17]

La estructura del prototipo parte del sistema modular de código abierto publicado en Thingiverse, sobre el que se harían ajustes para adaptarlo al cultivo de lechugas y a la electrónica de control. El conjunto se imprimiría en 3D y se compone de un depósito en la base, una serie de celdas de cultivo apilables, sus tapas, una tapa superior que reparte el agua y los soportes de la iluminación. Las figuras siguientes muestran los modelos del montaje.

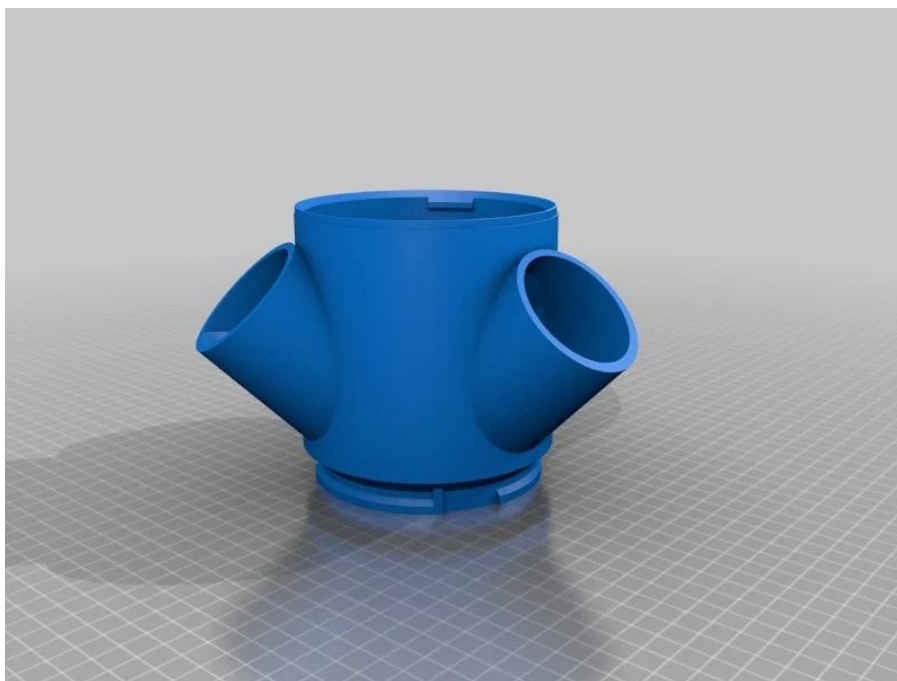


Figura 28. Módulo almacenamiento cultivo

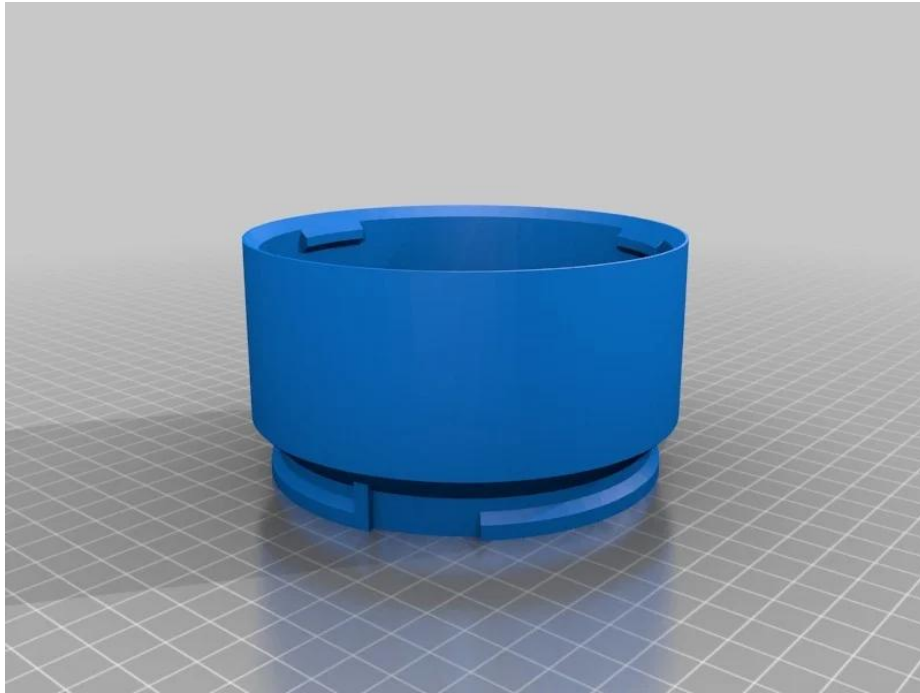


Figura 29. Depósito de agua

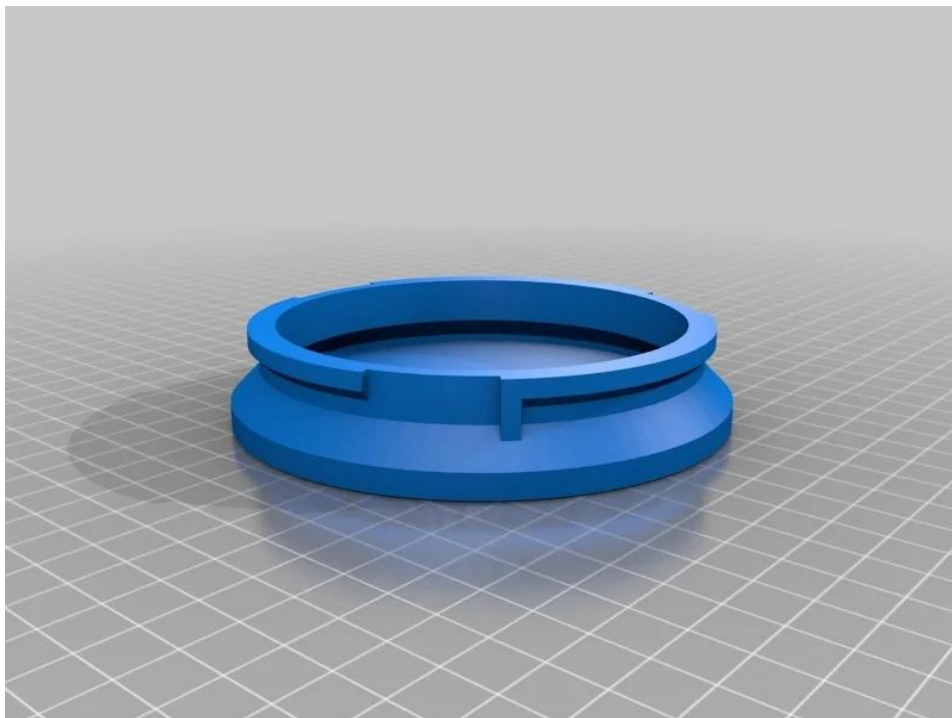


Figura 30. Tapa final de la torre

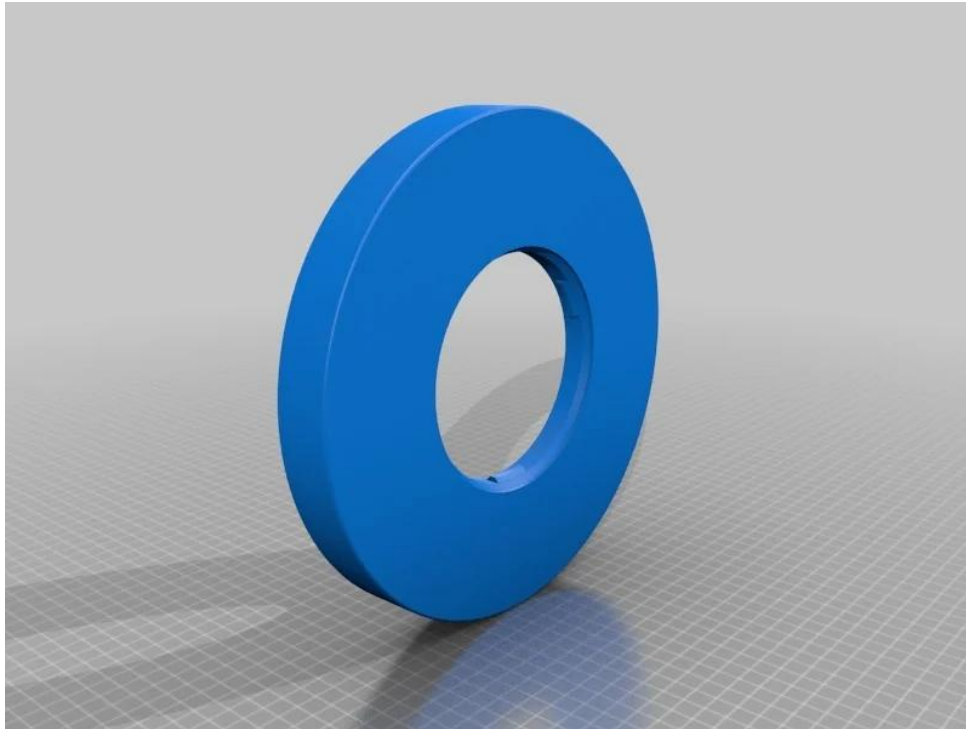


Figura 31. Tapa depósito y unión módulo

ANEXO III-ASIGNACIÓN MICROCONTROLADOR

Este anexo recoge la asignación completa de pines del microcontrolador ESP32 y las conexiones de cada componente del sistema, como referencia técnica para la replicación o modificación del prototipo.

SENSORES

Componente	Pin ESP32	GPIO
DS18B20 (T. agua)	D4	GPIO4
DHT22 (T./Hum. aire)	D5	GPIO5
Sensor pH (PH-4502C)	VP	GPIO34
Sensor TDS	VN	GPIO35
MQ135 (Calidad aire)	D32	GPIO32
Nivel de agua	D33	GPIO33
INA219 (Consumo)	D21 / D22	GPIO21 / GPIO22

Tabla 22. Conexionado Sensores

ACTUADORES Y VISUALIZACIÓN

Componente	Pin ESP32	GPIO
Módulo relé bomba	D25	GPIO25
LCD 20×4 I2C — SDA	D21	GPIO21
LCD 20×4 I2C — SCL	D22	GPIO22

Tabla 23. Conexión de Actuadores y LCD

LEDs

Los LEDs de alerta parpadean a 500 ms cuando la variable asociada se encuentra fuera de su rango óptimo.

Variable supervisada	GPIO
Temperatura del agua	GPIO12
Temperatura del aire / Humedad	GPIO13
pH	GPIO14
Conductividad (TDS)	GPIO26

Calidad del aire	GPIO27
Nivel del agua	GPIO15

Tabla 24. Conexionado Leds

ALIMENTACIÓN

El ESP32 opera a 3,3 V lógico. Los pines GPIO34 y GPIO35 son tolerantes únicamente a 3,3 V, no deben conectarse señales de 5 V sin divisor resistivo. Los sensores que requieren 5 V (MQ135, módulo relé, LCD) deben alimentarse desde una fuente externa o el pin VIN del DevKit cuando se usa alimentación USB de 5 V. El sensor de consumo se intercala en la entrada de alimentación, en serie con el resto de la electrónica, para medir el consumo global del sistema.

The screenshot displays the WOKWI Simulator interface, which is divided into two main sections: a dashboard on the left and a circuit diagram on the right.

HydroControl IoT Dashboard:

- Header:** "HydroControl IoT" with a status bar showing "Indicadores: todos OK", "0 Cálculo", and "Dashboard activo".
- Temperature (TEMP. AGUA):** A gauge showing 48% with a value of 22.0. Below it, a small gauge shows 40% with a value of 22.0.
- Pressure (PRES. AGUA):** A gauge showing 68% with a value of 68.
- Flow (FLUJO):** A gauge showing 45% with a value of 6.23.
- Temperature (TEMP. AMBIENTE):** A gauge showing 28% with a value of 1.41.
- Flow (FLUJO AMBIENTE):** A gauge showing 37% with a value of 1501.
- Buttons:** "NIVEL DE AGUA" (CORRECTO) and "PUMPA" (APAGADA).
- System Status:** "ESTADO DEL SISTEMA" showing "Sistema OK" with a timestamp of 03/10/2024 12:00.

Circuit Diagram:

- The diagram shows a microcontroller (Arduino Uno) connected to various sensors and actuators.
- Sensors:** A DHT11 temperature and humidity sensor is connected to the microcontroller. A flow sensor is also present.
- Actuators:** A pump (PUMPA) is connected to the microcontroller.
- Display:** A small LCD screen displays the following data: "Temp: 22.0", "Humid: 45%", "Pres: 68%", "Flujo: 6.23", "Temp: 1.41", "Flujo: 1501".

The image displays two side-by-side computer screens. The left screen shows the 'HydroControl IoT' dashboard, which features a dark blue background with several circular gauges and status indicators. The gauges display various metrics such as temperature (22.0 °C), pressure (48%), flow (45%), and power (6.23). The status indicators show 'CORRECTO' (Correct) and 'ACTIVA' (Active). The right screen shows the 'WOKwi Simulator' interface, which displays a detailed circuit diagram of a hydroelectric system. The diagram includes components like a generator, a controller, and a motor. A green box highlights a data readout showing values like 'RPM: 22.0', 'RPM: 22.0', 'V: 1.41', 'V: 1.41', 'P: 6.23', 'P: 6.23', 'T: 1.41', 'T: 1.41', 'D: 1.41', 'D: 1.41', 'S: 1.41', 'S: 1.41'.

The screenshot shows the WOKWI simulator interface for a water management system. The left panel contains six gauges:

- GAUGE 1:** 48% (green), 22.0 (Normal, Range: 16-30)
- GAUGE 2:** 40% (green), 22.0 (Normal, Range: 16-30)
- GAUGE 3:** 68% (green), 68 (Normal, Range: 40-80)
- GAUGE 4:** 24% (red), 3.31 (Critical, Range: 0-10)
- GAUGE 5:** 28% (green), 1.41 (Normal, Range: 1.0-2.0)
- GAUGE 6:** 37% (green), 1501 (Normal, Range: 0-2000)

The right panel shows a schematic of the system with components like pumps, valves, and a data logger. A green box highlights the data logger's output:

```

Desaf 22.0 Nivel22.0
Nivel68.0 Nivel68.0
phi 3.31 Nivel1.41
1m FUERA DE RANGO
  
```

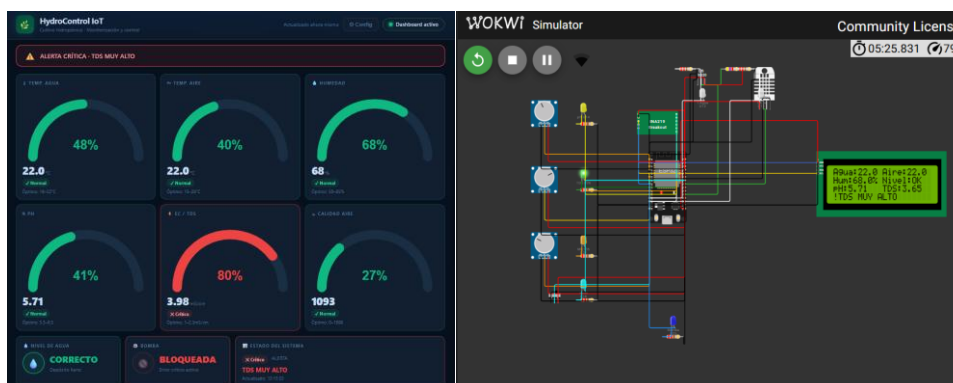


Figura 35. Estado TDS fuera de rango

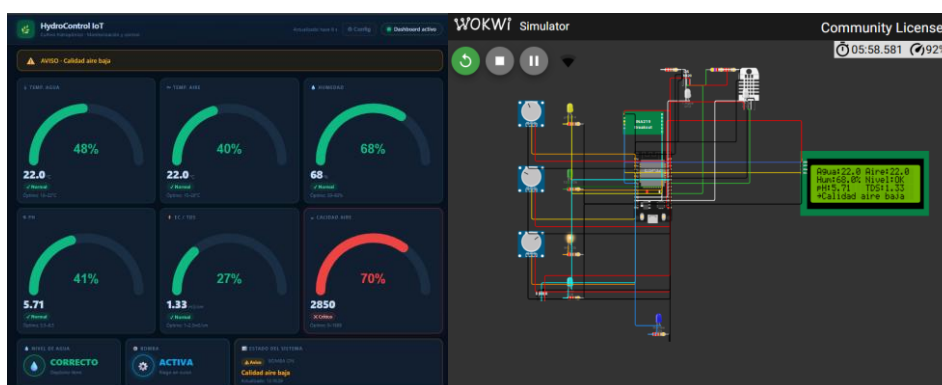


Figura 36. Estado calidad aire fuera de rango



Figura 37. Estado nivel agua fuera de rango

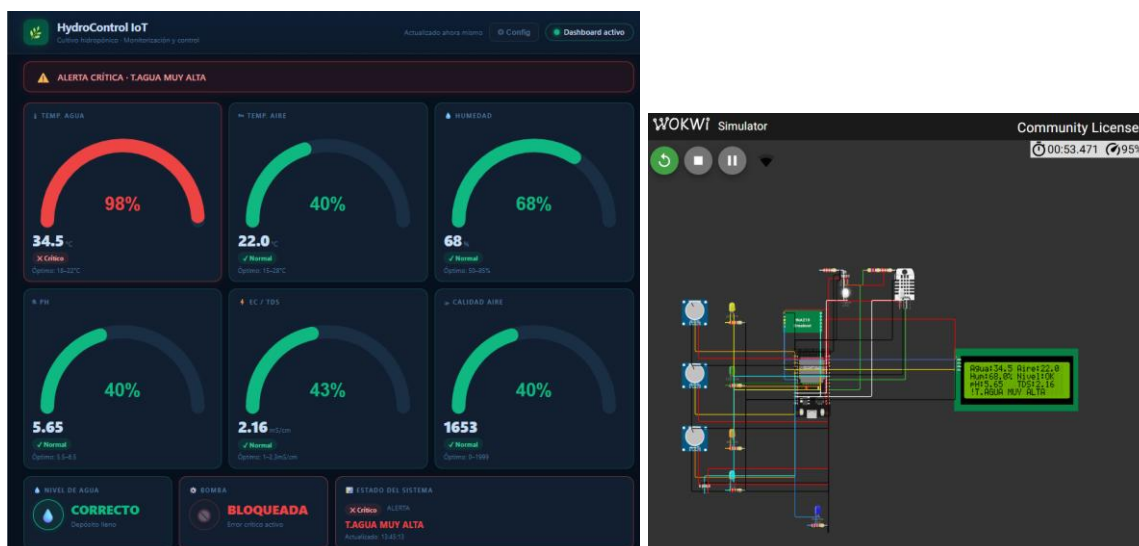


Figura 38. Estado Temperatura muy alta



Figura 39. Interfaz consumo energético

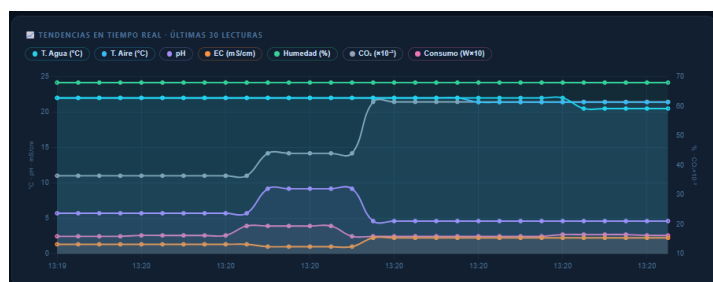


Figura 40. Interfaz cambio de variables ejemplo 1

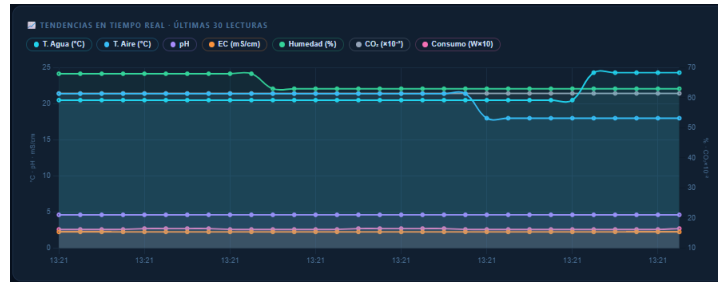


Figura 41. Interfaz cambio de variables ejemplo 2