

UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN ANTONIO ABAD DEL CUSCO
FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA, INFORMÁTICA Y
MECÁNICA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA INFORMÁTICA Y DE SISTEMAS



TESIS

GESTIÓN AUTÓNOMA DE VIVEROS HIDROPÓNICOS MEDIANTE
INTELIGENCIA ARTIFICIAL DE LAS COSAS, PARA EL USO
EFICIENTE DEL AGUA

PRESENTADO POR:

Br. JUAN CARLOS GUTIERREZ AMACHI

PARA OPTAR AL TÍTULO PROFESIONAL
DE INGENIERO INFORMÁTICO Y DE
SISTEMAS

ASESOR:

Mtr. JOSÉ MAURO PILLCO QUISPE

CUSCO-PERU
2025



Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco

INFORME DE SIMILITUD

(Aprobado por Resolución Nro. CU-321-2025-UNSAAC)

El que suscribe, el Asesor Mgt. José Mauro Pilloco Quispe
..... quien aplica el software de detección de similitud al
trabajo de investigación/tesis titulada: Gestión Autónoma de viveros Hidropónicos mediante
Inteligencia artificial de las Cosas, para el uso eficiente
del Agua

Presentado por: Juan Carlos Gutierrez Amachi DNI N° 47275959;
presentado por: DNI N°:
Para optar el título Profesional/Grado Académico de Ingeniero Informático
y de Sistemas

Informo que el trabajo de investigación ha sido sometido a revisión por 02 veces, mediante el
Software de Similitud, conforme al Art. 6° del **Reglamento para Uso del Sistema Detección de**
Similitud en la UNSAAC y de la evaluación de originalidad se tiene un porcentaje de 2%.

Evaluación y acciones del reporte de coincidencia para trabajos de investigación conducentes a grado académico o título profesional, tesis

Porcentaje	Evaluación y Acciones	Marque con una (X)
Del 1 al 10%	No sobrepasa el porcentaje aceptado de similitud.	X
Del 11 al 30 %	Devolver al usuario para las subsanaciones.	
Mayor a 31%	El responsable de la revisión del documento emite un informe al inmediato jerárquico, conforme al reglamento, quien a su vez eleva el informe al Vicerrectorado de Investigación para que tome las acciones correspondientes; Sin perjuicio de las sanciones administrativas que correspondan de acuerdo a Ley.	

Por tanto, en mi condición de Asesor, firmo el presente informe en señal de conformidad y adjunto las primeras páginas del reporte del Sistema de Detección de Similitud.

Cusco, 03 de Diciembre de 2025

José Mauro Pilloco Quispe
Firma
Post firma: José Mauro Pilloco Quispe
Nro. de DNI: 23861067
ORCID del Asesor: 0000-0002-0527-089X

Se adjunta:

- Reporte generado por el Sistema Antiplagio.
- Enlace del Reporte Generado por el Sistema de Detección de Similitud: oid: 27259:535913972

JUAN CARLOS GUTIERREZ AMACHI

Tesis_final V.2.2.pdf

 Universidad Nacional San Antonio Abad del Cusco

Detalles del documento

Identificador de la entrega

trn:old:::27259:535913972

192 páginas

Fecha de entrega

3 dic 2025, 1:31 p.m. GMT-5

36.004 palabras

214.012 caracteres

Fecha de descarga

3 dic 2025, 1:37 p.m. GMT-5

Nombre del archivo

Tesis_final V.2.2.pdf

Tamaño del archivo

9.7 MB

2% Similitud general

El total combinado de todas las coincidencias, incluidas las fuentes superpuestas, para ca...




Filtrado desde el informe

- Bibliografía
- Texto citado
- Texto mencionado
- Coincidencias menores (menos de 12 palabras)

Exclusiones



- N.º de coincidencias excluidas

Fuentes principales

- 1%  Fuentes de Internet
- 0%  Publicaciones
- 1%  Trabajos entregados (trabajos del estudiante)

Marcas de integridad

N.º de alertas de integridad para revisión

-  **Caracteres reemplazados**
42 caracteres sospechosos en N.º de páginas
Las letras son intercambiadas por caracteres similares de otro alfabeto.
-  **Texto oculto**
4 caracteres sospechosos en N.º de página
El texto es alterado para mezclarse con el fondo blanco del documento.

Los algoritmos de nuestro sistema analizan un documento en profundidad para buscar inconsistencias que permitirían distinguirlo de una entrega normal. Si advertimos algo extraño, lo marcamos como una alerta para que pueda revisarlo.

Una marca de alerta no es necesariamente un indicador de problemas. Sin embargo, recomendamos que preste atención y la revise.

Dedicatoria

A mis queridos padres, Porfirio Gutiérrez Chilltupa e Ysabel Amachi Puma, quienes con su amor y sacrificio han sido el pilar fundamental en mi vida. Gracias por su apoyo incondicional y por siempre creer en mí.

A mis hermanos Luis Alberto, Alexandra, y Gabriela, por ser mi constante motivación y ejemplo de perseverancia. Sus palabras de aliento me han acompañado a lo largo de este camino.

Y a mi amada novia Anace Mantilla Leon, por su paciencia, comprensión y apoyo incondicional, quienes me han ayudado a superar los desafíos y alcanzar este logro.

Agradecimientos

Quiero expresar mi más sincero agradecimiento al Mtr. José Mauro Pillco Quispe por su guía y constante apoyo en el desarrollo de esta investigación. Su experiencia y consejos han sido vitales para la culminación exitosa de este proyecto. Gracias por compartir su conocimiento y por su dedicación en cada etapa del proceso.

Resumen

La escasez hídrica constituye una limitación significativa para la agricultura en la comunidad de Mantoclla, en el distrito de Anta, motivo por el cual esta investigación propone el diseño e implementación de un fitotoldo hidropónico cerrado basado en AIoT (Inteligencia Artificial + Internet de las Cosas) con el objetivo de reducir el consumo del agua en el cultivo de rábanos. El sistema empleará la técnica hidropónica NFT (*Nutrient Film Technique*), que permite la recirculación continua de una delgada lámina de solución nutritiva sobre las raíces, gestionando de forma eficiente el recurso hídrico. El control estará a cargo de un modelo de inteligencia artificial entrenado con el algoritmo de aprendizaje por refuerzo *Soft Actor-Critic* (SAC), encargado de regular automáticamente parámetros clave como el pH, la conductividad eléctrica (EC) y el funcionamiento de la bomba de recirculación en función de la temperatura ambiente. Para garantizar su operatividad en zonas rurales con acceso limitado a la red eléctrica, el sistema utilizará energía solar complementada con un temporizador programado, asegurando eficiencia energética sin comprometer el control ambiental. El modelo será previamente entrenado en un entorno simulado que represente el comportamiento físico del sistema, con el fin de afinar su desempeño antes de su implementación real. La investigación se enfocará en el diseño, integración y evaluación del sistema, y al finalizar este ofrecerá una alternativa viable para mejorar la eficiencia hídrica en cultivos específicos bajo condiciones controladas, como el rábano en fitotoldos cerrados.

Palabras clave: AIoT, Hidroponía NFT, *Soft Actor-Critic*, Ph.

Abstract

Water scarcity constitutes a significant limitation for agriculture in the community of Mantoclla, located in the district of Anta. In response, this research proposes the design and implementation of a closed hydroponic greenhouse (fitotoldo) based on AIoT (Artificial Intelligence + Internet of Things) with the aim of reducing water consumption in radish cultivation. The system will employ the NFT hydroponic technique (*Nutrient Film Technique*), which allows for the continuous recirculation of a thin layer of nutrient solution over the roots, enabling more efficient water management.

Control of the system will be carried out by an artificial intelligence model trained with the *Soft Actor-Critic* (SAC) reinforcement learning algorithm, responsible for automatically regulating key parameters such as pH, electrical conductivity (EC), and the operation of the recirculation pump based on ambient temperature. To ensure its operation in rural areas with limited access to the power grid, the system will be powered by solar energy, supplemented by a programmed timer, ensuring energy efficiency without compromising environmental control.

The model will be previously trained in a simulated environment that replicates the physical behavior of the system, in order to fine-tune its performance before real-world deployment. The research will focus on the design, integration, and evaluation of the system, and it is expected that, upon completion, it will offer a viable alternative to improve water efficiency in specific crops under controlled conditions, such as radishes in closed greenhouse environments.

Keywords: AIoT, NFT Hydroponics, *Soft Actor-Critic*, Ph.

Introducción

En el Perú, la agricultura consume aproximadamente el 80% del agua disponible, siendo las regiones altoandinas como la comunidad de Mantoclla (Anta, Cusco) las más afectadas por la escasez hídrica. Esta problemática se agrava por prácticas de riego ineficientes y condiciones climáticas extremas, donde las sequías recurrentes han destruido cultivos esenciales y afectado la seguridad alimentaria de cientos de familias. Ante este escenario, resulta urgente y oportuno implementar soluciones tecnológicas que mejoren el uso del agua sin comprometer la producción agrícola.

Esta investigación propone el desarrollo de un sistema hidropónico NFT (*Nutrient Film Technique*) automatizado mediante Inteligencia Artificial de las Cosas (AIoT), específicamente diseñado para el cultivo de rábanos en fitotoldos altoandinos. El sistema integra sensores de pH, conductividad eléctrica (EC) y temperatura, controlados por un modelo de aprendizaje por refuerzo basado en el algoritmo *Soft Actor-Critic* (SAC). Este enfoque permite una gestión autónoma y adaptativa de los recursos hídricos, ajustando la recirculación de nutrientes en función de las condiciones ambientales en tiempo real.

Además, el sistema incorpora un diseño energéticamente sostenible, combinando paneles solares con un temporizador programable para garantizar su operatividad en zonas rurales con acceso limitado a la red eléctrica. La implementación de este prototipo no solo busca demostrar la viabilidad técnica de la hidroponía inteligente en contextos altoandinos, sino también cuantificar su eficiencia hídrica frente a los métodos tradicionales de riego. De este modo, el estudio integra soluciones tecnológicas con las necesidades prácticas de poblaciones rurales, aportando al avance científico y a la seguridad alimentaria en el Perú.

Lista de abreviaturas

- **AIoT** - *Artificial Intelligence of Things* (Inteligencia Artificial de las Cosas)
- **ANOVA** - *Analysis of Variance* (Análisis de Varianza)
- **Co-Design** - *Hardware-Software Co-Design* (Diseño conjunto hardware-software)
- **DHT** - *Digital Humidity and Temperature* (Sensor digital de humedad y temperatura)
- **EC** - *Electrical Conductivity* (Conductividad Eléctrica)
- **GPIO** - *General Purpose Input/Output* (Entrada/Salida de Propósito General)
- **GUI** - *Graphical User Interface* (Interfaz Gráfica de Usuario)
- **I2C** - *Inter-Integrated Circuit* (Protocolo de comunicación serial)
- **IA** - Inteligencia Artificial
- **IoT** - *Internet of Things* (Internet de las Cosas)
- **MAE** - *Mean Absolute Error* (Error Absoluto Medio)
- **NFT** - *Nutrient Film Technique* (Técnica de Película de Nutrientes)
- **pH** - *Potential of Hydrogen* (Potencial de Hidrógeno)
- **RPi** - Raspberry Pi
- **RMSE** - *Root Mean Square Error* (Error Cuadrático Medio)
- **SAC** - *Soft Actor-Critic* (Algoritmo de aprendizaje por refuerzo)
- **SCRUM** - Framework ágil de gestión de proyectos
- **SSH** - *Secure Shell* (Protocolo de acceso remoto seguro)
- **TDS** - *Total Dissolved Solids* (Sólidos Disueltos Totales)

Índice General

Resumen.....	iii
Abstract	iv
Introducción	v
Lista de abreviaturas	vi
1. Aspectos generales	1
1.1. Descripción del problema	1
1.2. Identificación del problema.....	2
1.3. Formulación del problema.	3
2. Objetivos	4
3. Justificación de la investigación.....	5
4. Alcances y limitaciones.....	8
4.1. Alcances	8
4.2. Limitaciones	9
5. Marco teórico	13
5.1. Antecedentes	13
5.2. Contexto agroclimático y productivo de la comunidad de Mantoclla	21
5.3. Descripción general de sistemas hidropónicos	25
5.4. Parámetros clave en hidroponía	36
5.5. Parámetros agronómicos clave para el cultivo de rábanos en sistemas hidropónicos	39

5.6.	Inteligencia artificial y aprendizaje por refuerzo profundo para la automatización de parámetros agrícolas.	44
5.7.	Algoritmo SAC como herramienta de automatización agrícola	51
5.8.	Diseño de entornos simulados con OpenAI GyM para aprendizaje por refuerzo en sistemas hidropónicos	54
5.9.	Arquitectura conceptual del sistema hidropónico inteligente basado en aprendizaje por refuerzo profundo.....	56
5.10.	Fundamentos tecnológicos y herramientas de desarrollo para la implementación del sistema hidropónico inteligente	74
5.11.	Metodología de desarrollo del sistema AIoT	77
5.12.	Métodos de evaluación de la eficiencia hídrica en sistemas hidropónicos	81
6.	Diseño metodológico	84
6.1.	Tipo de investigación	84
6.2.	Método de la investigación	84
6.3.	Diseño de la investigación	84
6.4.	Enfoque de la investigación	86
6.5.	Población y muestra	86
6.6.	Técnicas e instrumentos de recolección de datos.....	88
6.7.	Unidad experimental.	89
6.8.	Variables a medir.	89
6.9.	Etapas de la recolección de datos.....	91

6.10. Almacenamiento y análisis de datos.	92
6.11. Técnicas de análisis de datos.....	93
7. Desarrollo de tesis	94
7.1. Metodología de desarrollo basada en Hardware–Software Co-Design y SCRUM	94
8. Resultados	149
8.1. Consumo hídrico	149
8.2. Estabilidad de la solución nutritiva (pH y CE)	150
8.3. Autonomía tecnológica	151
8.4. Desempeño del agente SAC.....	151
8.5. Integración de hallazgos experimentales	153
9. Conclusiones	162
10. Recomendaciones	164
11. Presupuesto	166
11.1. Cronograma de actividades	168
12. Bibliografía	169
13. Anexos.	178
13.1. Repositorio del código fuente	178

Índice de Tablas

Tabla 1: <i>Cuadro comparativo de antecedentes</i>	20
Tabla 2: <i>Cuadro comparativo entre cultivo hidropónico y cultivo en suelo</i>	24
Tabla 3: <i>Comparación de diferentes sistemas hidropónicos</i>	32
Tabla 4: <i>Parámetros y rangos óptimos para el cultivo de rábano</i>	40
Tabla 5: <i>Cuadro comparativo entre SAC vs DQN vs PPO, algoritmos de aprendizaje por refuerzo</i>	50
Tabla 6: <i>Fases del desarrollo del sistema AIoT</i>	80
Tabla 7: <i>Variables del sistema hidropónico</i>	90
Tabla 8: <i>Condiciones ideales del entorno para rábanos</i>	112
Tabla 9: <i>Función de recompensa y penalización para cada variable</i>	113
Tabla 10: <i>Presupuesto estimado para la implementación del proyecto</i>	167

Tabla de Ilustraciones

Ilustración 1: <i>Corte transversal de fitotoldo estándar</i>	23
Ilustración 2: <i>Maqueta de fitotoldo tipo capilla</i>	24
Ilustración 3: <i>Técnicas en hidroponía</i>	27
Ilustración 4: <i>Crecimiento de plantas y de sus hojas – observación de 30 días</i>	33
Ilustración 5: <i>Intervalos de ph adecuados para diversas hortalizas y a disponibilidad de los nutrientes en relación con el pH</i>	41
Ilustración 6: <i>Comparación experimental de algoritmos de aprendizaje por refuerzo para la gestión inteligente de parámetros hidropónicos</i>	49
Ilustración 7: <i>Representación general del proceso de aprendizaje por refuerzo de un solo paso.</i>	51
Ilustración 8: <i>Raspberry pi 4 modelo B</i>	58
Ilustración 9: <i>Sensor digital de temperatura y humedad DHT11</i>	60
Ilustración 10: <i>Sensor regulador de detección de valor de pH líquido 0-14</i>	61
Ilustración 11: <i>Módulo ADS1015 I2C de 16 bits</i>	62
Ilustración 12: <i>Sensor de TDS/EC, medidor de solución nutritiva</i>	63
Ilustración 13: <i>Sensor de nivel de agua líquida para tanque de 12-24V</i>	64
Ilustración 14: <i>Módulo de relé de interruptor para Motor</i>	64
Ilustración 15: <i>Mini bomba de agua sumergible de 12 V</i>	65
Ilustración 16: <i>Bomba peristáltica CC 12V Micro bomba de líquido peristáltico silenciosa</i>	66
Ilustración 17: <i>Módulo de relé de 5v - 12v</i>	67
Ilustración 18: <i>Placa de pruebas(Proto board)</i>	68

Ilustración 19: <i>Cables Dupont</i>	69
Ilustración 20: <i>Medidores de PH y TDS/EC digital</i>	70
Ilustración 21: <i>Panel solar + controlador de carga+bateria+ inversor de energia con salida de 220 v a 12 v</i>	72
Ilustración 22: <i>Temporizaro digital programable</i>	72
Ilustración 23: <i>Flujo hardware/software co-design</i>	78
Ilustración 24: <i>Diagrama de funcionamiento sistema hidropónico inteligente</i>	85
Ilustración 25: <i>Disposición del sistema hidropónico basado en AIoT</i>	86
Ilustración 26: <i>Fitotoldo tipo Capilla</i>	87
Ilustración 27: <i>Esquema visual del montaje experimental.</i>	88
Ilustración 28: <i>Co-Design + Scrum: Flujo del desarrollo modular del sistema AIoT</i>	95
Ilustración 29: <i>Aplicación de Trello en la planificación basada en Scrum y Co-Design</i>	96
Ilustración 30: <i>Cronograma de actividades de desarrollo, diagrama gantt del proyecto</i>	97
Ilustración 31: <i>Medición y ajuste manual de parametros pH y EC/TDS</i>	99
Ilustración 32: <i>Fitotoldos abandonados por escazes hidrica</i>	100
Ilustración 33: <i>Diagrama físico del sistema AIoT</i>	107
Ilustración 34: <i>Diagrama lógico del sistema AIoT</i>	108
Ilustración 35: <i>Conexión eléctrica de componentes</i>	109
Ilustración 35: <i>Librerías utilizadas en el proyecto</i>	115
Ilustración 36: <i>Conexión de sensores y módulos</i>	117
Ilustración 37: <i>Conexión de bombas peristálticas</i>	118
Ilustración 38: <i>Sensor de pH y EC/TDS concetados a modulo ADS1015</i>	119
Ilustración 39: <i>Sensor de temperatura DHT11 y Pantalla LCD I2C</i>	120

Ilustración 40: <i>Sistema físico de conexiones completo</i>	120
Ilustración 41: <i>Montaje de sistema de alimentación de energía</i>	122
Ilustración 42: <i>Verificación de activación de bombas</i>	123
Ilustración 43: <i>Código para la recepción de sensores de pH, TDS/EC, temperatura y humedad</i>	124
Ilustración 44: <i>Comprobación de lectura de sensores pH, EC/TDS, temperatura y humedad</i> .	125
Ilustración 45: <i>Codificación del entorno OptimizedHydroponicEnv en Python</i>	127
Ilustración 46: <i>Espacio de observación y acción continuos</i>	129
Ilustración 47: <i>Sistema de recompensas</i>	131
Ilustración 48: <i>Sistema de penalizaciones</i>	132
Ilustración 49: <i>Entrenamiento de modelo con el algoritmo SAC</i>	134
Ilustración 50: <i>Prueba de modelo entrenado en 50 episodios con pH final y TDS/EC final</i>	135
Ilustración 51: <i>Función de calibración para sensores de pH y nutrientes</i>	136
Ilustración 52: <i>Validación de lectura de sensores y lecturas reales</i>	137
Ilustración 53: <i>Montaje físico completo del sistema AIoT en el fitotoldero</i>	142
Ilustración 54: <i>Variación del pH, lectura actual y lectura después de la intervención del sistema AIoT</i>	144
Ilustración 55: <i>Variación del TDS, lectura actual y lectura después de la intervención del sistema AIoT</i>	144
Ilustración 56: <i>Actividad de la bomba de recirculación en función de la temperatura</i>	145
Ilustración 57: <i>Integración final: carga y despliegue de modelo, sistema de control funcional y guardado de reporte de lecturas y acciones y otros parámetros</i>	147
Ilustración 58: <i>Cronograma de actividades general</i>	168

1. Aspectos generales

1.1. Descripción del problema

En el Perú, la agricultura representa aproximadamente el 80 % del consumo de agua a nivel nacional, según la Autoridad Nacional del Agua (ANA). Esta alta demanda se ve agravada por prácticas tradicionales de riego poco eficientes, que provocan importantes pérdidas del recurso hídrico de hasta el 70% (Agraria.pe, 2023). Además, el Centro Nacional de Planeamiento Estratégico (CEPLAN) advierte que, para el año 2030, más del 58 % de la población peruana estará expuesta a condiciones de estrés hídrico, comprometiendo directamente la sostenibilidad agrícola y la seguridad alimentaria (Ceplan, 2024).

En la región Cusco, particularmente en la comunidad de Mantoclla, ubicada en el distrito y provincia de Anta, las condiciones climáticas de sierra presentan una marcada estacionalidad, con lluvias concentradas en pocos meses y largos periodos de sequía. Esta situación se ve agravada por la falta de infraestructura adecuada para el almacenamiento y distribución eficiente del agua, lo cual genera pérdidas frecuentes en cultivos locales como papa, quinua, repollo y rábanos. En 2023 las sequías recurrentes han afectado a 510 hectáreas y destruido 105 hectáreas de cultivos, perjudicando a 917 familias aproximadamente (Ima Cusco & Ceneq, 2024).

Ante esta realidad, resulta urgente el desarrollo de soluciones tecnológicas sostenibles que permitan optimizar el uso del agua en la agricultura. Los sistemas hidropónicos de ciclo cerrado, ofrecen una alternativa prometedora al permitir la recirculación del agua y una dosificación precisa de nutrientes. No obstante, su implementación en comunidades rurales como Mantoclla aún es incipiente, debido a la falta de estudios que analicen su viabilidad técnica y adaptación al contexto local.

1.2. Identificación del problema

La comunidad de Mantoclla, en el distrito de Anta (Cusco), enfrenta una creciente escasez hídrica agravada por la estacionalidad climática, la falta de infraestructura de almacenamiento y la dependencia de prácticas agrícolas tradicionales poco eficientes. Aunque muchas familias han implementado fitotoldos para proteger sus cultivos, estos sistemas suelen utilizar riego por inundación o goteo artesanal, sin mecanismos de recirculación ni control automatizado, lo que genera un uso ineficiente del agua y pérdidas importantes por escurrimiento y evaporación. Esta situación compromete la seguridad alimentaria y el rendimiento productivo, especialmente en cultivos de ciclo corto como el rábano.

Si bien existen tecnologías como los sistemas hidropónicos de recirculación (NFT), su implementación en comunidades rurales sigue siendo limitada, debido a desconocimiento y de falta de adaptación al contexto altoandino. Además, tecnologías emergentes como la Inteligencia Artificial de las Cosas (AIoT) y los algoritmos de aprendizaje por refuerzo, que han demostrado eficacia en entornos controlados, aún no se han aplicado ni validado en estos escenarios. Esta brecha tecnológica evidencia la necesidad urgente de desarrollar soluciones inteligentes, autónomas y sostenibles que integren control automático de variables clave como pH, CE y temperatura. Al ser aplicadas de forma contextualizada en fitotoldos rurales, estas tecnologías pueden mejorar significativamente la eficiencia en el uso del agua, al reducir el desperdicio y optimizar la dosificación según las necesidades reales del cultivo.

1.3. Formulación del problema.

1.3.1. Problema general

¿De qué manera un sistema hidropónico NFT de ciclo cerrado, basado en tecnologías AIoT, puede mejorar la eficiencia del uso del agua en el cultivo de rábanos en fitotoldos de la comunidad de Mantoclla?

1.3.2. Problemas específicos

- ¿Qué tipo de sistema hidropónico de ciclo cerrado resulta más eficiente en términos de uso del agua para su aplicación en fitotoldos de la comunidad de Mantoclla?
- ¿Qué modelo de inteligencia artificial es el más adecuado para gestionar la recirculación del agua en función de la temperatura y estabilizar parámetros clave como el pH y la conductividad eléctrica?
- ¿Qué componentes tecnológicos —plataformas, sensores, actuadores y elementos de comunicación— son los más adecuados para desarrollar un sistema AIoT funcional y replicable en un entorno rural como Mantoclla?
- ¿Qué metodología de desarrollo permite estructurar e integrar de manera progresiva y contextualizada los componentes físicos, digitales e inteligentes del sistema AIoT propuesto?
- ¿Cuál es el nivel de ahorro de agua logrado por el sistema propuesto en un ciclo de cultivo, comparado con los métodos tradicionales de riego utilizados actualmente en los fitotoldos de la comunidad?

2. Objetivos

2.1.1. *Objetivo general*

Diseñar e implementar un sistema de gestión autónoma para viveros hidropónicos basado en tecnologías de Inteligencia Artificial de las Cosas (AIoT), que permita optimizar el uso del agua en el cultivo de rábanos dentro de fitotoldos de la comunidad de Mantoclla, Anta.

2.1.2. *Objetivos específicos*

- Seleccionar el sistema hidropónico de ciclo cerrado más eficiente en el uso del agua para su aplicación en fitotoldos de la comunidad de Mantoclla.
- Determinar el modelo de inteligencia artificial más adecuado para gestionar la recirculación del agua en función de la temperatura y estabilizar parámetros críticos como el pH y la conductividad eléctrica (EC).
- Definir los componentes tecnológicos (plataforma de control, sensores, actuadores y elementos de comunicación) para implementar un sistema AIoT funcional en condiciones rurales.
- Seleccionar una metodología de desarrollo integral que permita estructurar, validar e integrar progresivamente los componentes físicos, digitales e inteligentes del sistema AIoT.
- Evaluar el nivel de ahorro de agua logrado en un ciclo de cultivo de 35 días, expresado en litros por planta, en comparación con los métodos de riego tradicionales empleados en los fitotoldos de la comunidad.

3. Justificación de la investigación

En los últimos años, organizaciones como la Fundación Ayuda en Acción han promovido la instalación de fitotoldos en comunidades altoandinas de Cusco, Puno y Apurímac para combatir la desnutrición infantil y fortalecer la seguridad alimentaria. Gracias a estas estructuras, más de 800 familias han logrado cultivar hortalizas en zonas donde las bajas temperaturas impiden su crecimiento a campo abierto. Además, solo en la comunidad de Mantoclla (Anta), se estima que más de 80 familias cuentan actualmente con fitotoldos, lo cual representa una oportunidad concreta para diversificar la producción agrícola y mejorar la nutrición familiar (Coeeci, 2025).

Además, el Estado Peruano también ha apostado recientemente por la hidroponía como alternativa de producción resiliente frente a la escasez de agua. A inicios de 2024, el MIDAGRI, a través del INIA, completó la instalación de más de 500 módulos hidropónicos en comunidades rurales de Cusco, incluyendo la provincia de Anta, beneficiando directamente a más de 2,500 agricultores (Midagri-Inia, 2024).

Sin embargo; pese a su potencial, la mayoría de estos fitotoldos opera aún con métodos tradicionales de riego como el goteo artesanal o la inundación, y sistema de circulación continua. Esto genera un uso ineficiente del recurso hídrico, con pérdidas significativas por escurrimiento. En algunos casos, la escasez de agua ha llevado incluso al abandono de los fitotoldos, frustrando los esfuerzos por consolidar una producción sostenible y continua. Esta situación no responde únicamente a factores económicos, sino también a la limitada difusión de tecnologías apropiadas que optimicen la gestión del recurso hídrico.

Frente a esta problemática, la presente investigación propone el diseño e implementación de un sistema de cultivo hidropónico NFT (*Nutrient Film Technique*) de ciclo cerrado, basado en

tecnologías AIoT. Este sistema permitirá monitorear y regular parámetros clave como el pH, la conductividad eléctrica (EC) y la temperatura ambiente, automatizando la operación de la bomba de recirculación para reducir el consumo de agua y estabilizar las condiciones del cultivo. Por ejemplo, ante temperaturas elevadas, el sistema operará de forma continua para evitar el estrés térmico en las raíces; mientras que en condiciones normales, funcionará por intervalos, priorizando el ahorro hídrico sin comprometer el desarrollo vegetal.

Adicionalmente, para garantizar la autonomía energética y adaptarse a contextos rurales con acceso limitado a la red eléctrica, el sistema será alimentado mediante un panel solar y controlado por un temporizador, lo que permitirá su funcionamiento dentro de horarios definidos. Esta estrategia no solo reduce el consumo energético, sino que asegura una operación eficiente y sostenible acorde a las condiciones altoandinas, además, estará combinado con conexión a la red eléctrica local como respaldo en caso de días lluviosos y nublados.

La hidroponía, al eliminar la dependencia del suelo y permitir una nutrición precisa mediante soluciones nutritivas, puede reducir drásticamente el uso del agua. Para producir un kilogramo de rábanos, se requieren aproximadamente:

- 60 litros en cultivo a campo abierto por kilogramo,
- 22 litros en hidropónico sin recirculación,
- 10 litros en hidropónico con recirculación,

Esto representa un ahorro de hasta un 93 % del agua de riego en comparación con el cultivo tradicional (Hydroponicsystems, 2020). Tal eficiencia resulta especialmente relevante en zonas como Mantoclla, donde el recurso hídrico es escaso y estacional.

Desde el punto de vista académico, esta investigación contribuirá al desarrollo de soluciones inteligentes de agricultura de precisión en zonas rurales altoandinas, donde existe escasa literatura y aplicación práctica de modelos basados en inteligencia artificial. Uno de los principales aportes del modelo de IA radica en su adaptabilidad a condiciones variables. Incluso en un entorno controlado como un fitotoldo, las condiciones ambientales fluctúan constantemente: temperatura, pH, EC, humedad, entre otras. Un sistema con lógica estática ha demostrado sobre ajustar los parámetros de pH y EC porque no puede evitar activar bombas de corrección apenas se detecta una desviación mínima, incluso si dicha fluctuación es inofensiva o pasajera. En cambio, un modelo de IA basado en aprendizaje por refuerzo profundo puede aprovechar la experiencia acumulada y el contexto operativo del sistema para decidir si una acción correctiva es realmente necesaria. Por ejemplo, si la conductividad eléctrica (CE) aumenta ligeramente, el modelo puede reconocer si esta variación es parte de una oscilación normal del sistema o si requiere intervención inmediata. Esta capacidad de análisis contextual evita activaciones innecesarias, reduce el desgaste de los componentes y optimiza el uso de insumos.

Al aplicar esta técnica de IA en un sistema hidropónico NFT controlado mediante tecnologías AIoT, se espera no solo generar evidencia empírica sobre su viabilidad, sino también aportar un modelo replicable para futuras investigaciones y proyectos de innovación agrícola en contextos similares. Esta propuesta busca contribuir tanto al avance del conocimiento científico como al desarrollo sostenible de las comunidades rurales altoandinas.

4. Alcances y limitaciones

4.1. Alcances

- Diseñar e implementar un sistema hidropónico NFT de ciclo cerrado adaptado a las condiciones agroclimáticas de la comunidad de Mantoclla.
- Seleccionar un modelo de inteligencia artificial basado en aprendizaje por refuerzo que permita automatizar la recirculación del agua considerando la temperatura ambiente como variable de entrada y estabilizar parámetros como pH y conductividad eléctrica (EC).
- Determinar los componentes tecnológicos (sensores, actuadores, microcontroladores, interfaces) más adecuados para la implementación física del sistema AIoT en un entorno rural.
- Adoptar una metodología de desarrollo del sistema AIoT, con el objetivo de estructurar, validar e integrar los componentes físicos, digitales e inteligentes del sistema de manera progresiva y contextualizada.
- Integrar la solución completa en una plataforma AIoT funcional, alimentada con energía solar y controlada mediante una Raspberry Pi, que permita operar el sistema de manera autónoma.
- Medir y comparar el consumo de agua del sistema propuesto, expresado en litros por planta en un ciclo de cultivo de (25–35) días, frente a los sistemas de riego tradicionales utilizados en fitotoldos de la comunidad.

4.2. Limitaciones

4.2.1. Limitación espacial

El sistema se valida exclusivamente en la comunidad de Mantoclla, ubicada en el distrito de Anta, región Cusco. Por lo tanto, los resultados obtenidos están condicionados por las particularidades agroclimáticas de esta zona específica. Si bien el sistema puede ser adaptado a otros entornos rurales, su desempeño podría variar en función de factores como altitud, tipo de fitotoldo, temperatura, radiación solar o calidad del agua disponible.

4.2.2. Limitación temporal

El proyecto se desarrolla y valida durante un único ciclo agrícola, centrado en el cultivo de rábanos (25–35 días). No se consideran ciclos múltiples ni los efectos acumulativos de largo plazo en componentes como sensores, soluciones nutritivas o sustratos. Asimismo, no se contempla la evaluación estacional del rendimiento del sistema.

4.2.3. Limitación técnica

El sistema depende de componentes electrónicos importados, tales como sensores de pH y CE, microcontroladores (Raspberry Pi), bombas peristálticas y módulos de relé. Esta dependencia podría limitar su escalabilidad inmediata en zonas con restricciones logísticas o presupuestarias. Además, el entrenamiento del modelo de inteligencia artificial se realiza en un entorno simulado, lo que puede generar discrepancias frente al comportamiento en condiciones reales. Si bien se implementarán procesos de calibración para minimizar estos desajustes, pueden persistir ciertas diferencias.

Variabilidad de sensores económicos.

Los sensores de bajo costo empleados en la implementación presentan una mayor tendencia a la deriva, sensibilidad a interferencias y necesidad de recalibraciones frecuentes en comparación con sondas de mayor calidad. Esta variabilidad puede introducir ruido en las series temporales de medición y generar acciones de control erráticas si no se aplican filtros, validaciones y protocolos de calibración estrictos. En consecuencia, la reproducibilidad de los resultados a mediano y largo plazo puede verse comprometida si no se implementan procedimientos de mantenimiento y verificación periódica.

Degradación de componentes.

Los componentes activos del sistema (baterías, bombas peristálticas y otros actuadores) muestran signos de degradación por ciclos de uso. En este estudio se observó una disminución de la autonomía de la batería —aproximadamente de 4 días a 3 días— manteniendo la misma lógica de bombeo, lo que indica una pérdida de eficiencia con el tiempo. Esta degradación puede afectar la disponibilidad operativa y la precisión del control en periodos prolongados si no se consideran reposición de recursos, recalcule de dimensionamiento energético y planes de mantenimiento.

4.2.4. Limitación de alcance funcional

El análisis se enfoca únicamente en el cultivo de rábanos, seleccionado por su ciclo corto, bajo requerimiento estructural y alta sensibilidad a variables como pH, temperatura y conductividad eléctrica. No se incluyen otros cultivos en la validación, aunque el sistema es adaptable a especies con requerimientos agronómicos similares.

Adicionalmente, el modelo de inteligencia artificial (SAC) fue calibrado y entrenado bajo las condiciones agroclimáticas específicas de la comunidad de Mantoclla (latitud 13.5° S, altitud

aproximada de 3 000 m s. n. m.), donde predominan temperaturas templadas diurnas y baja humedad relativa. Por tanto, el desempeño del sistema podría variar si se implementa en zonas con diferente latitud o clima, como la costa o la selva, donde la radiación solar, la evaporación y la absorción de nutrientes difieren significativamente.

En tales casos, sin un proceso de reentrenamiento o ajuste de parámetros, el modelo podría presentar desviaciones en el control del pH o la conductividad eléctrica, afectando la eficiencia hídrica y la estabilidad del cultivo.

Aunque se realizaron pruebas preliminares en otros cultivos (lechuga, tomate, cebolla china y acelga) que mostraron respuestas favorables, la generalización de los parámetros de control (pH objetivo, conductividad eléctrica, frecuencia de riego) a otras especies y condiciones climáticas requiere validación experimental local.

Por ello, la extrapolación de los resultados obtenidos debe considerarse con cautela, y la replicación del sistema en otras zonas geográficas debería contemplar un proceso de ajuste adaptativo del modelo y de calibración de sensores, considerando los factores agroclimáticos propios de cada entorno.

4.2.5. Limitación química: dependencia del reactivo

La relación entre volumen agregado (mL) y el efecto sobre las variables (por ejemplo, cambio de pH) depende de la composición, concentración y dosificación del reactivo utilizado (marca y lote). Durante la implementación se constató que algunas soluciones acidificantes o nutritivas presentan una respuesta por unidad de volumen marcadamente distinta entre sí; por tanto, toda conversión entre la salida continua del modelo y el volumen físico debe sostenerse mediante calibraciones experimentales específicas para cada producto. La falta de esta

recalibración al cambiar de reactivo puede llevar a sobredosificaciones o correcciones insuficientes.

4.2.6. *Limitación de conectividad*

La disponibilidad limitada de Internet en la comunidad de Mantoclla impone restricciones a la telemetría en tiempo real, actualizaciones remotas y supervisión continua. Esto condiciona la implantación de soluciones basadas en nube o protocolos que requieran conectividad permanente (por ejemplo, envío inmediato de alertas por MQTT). Se recomienda diseñar el sistema para operar de forma autónoma (almacenamiento local de registros, reintentos de envío y transmisión diferida) y considerar alternativas de comunicación (GSM/4G, recolección presencial de datos, o redes de baja potencia) en función de la factibilidad económica y logística.

4.2.7. *Observaciones finales sobre limitaciones*

En resumen, las limitaciones identificadas (espaciales, temporales, técnicas, químicas, de conectividad y de alcance funcional) condicionan la validez externa de los resultados y deben considerarse al replicar o escalar la solución a otros contextos. Se recomienda que futuros trabajos amplíen el periodo de validación, incorporen más ciclos agrícolas, utilicen equipos de mayor calidad para comparar resultados y evalúen estrategias de comunicación alternativas adaptadas al entorno local.

5. Marco teórico

5.1. Antecedentes

5.1.1. *Antecedentes internacionales*

Rahman, M. A., Chakraborty, N. R., Sufiun, A., Banshal, S. K., & Tajnin, F. R. (2024). *An AIoT-based hydroponic system for crop recommendation and nutrient parameter monitorization*. Smart Agricultural Technology, 8(100472), 100472. <https://doi.org/10.1016/j.atech.2024.100472>

Rahman et al. (2024) diseñaron un sistema hidropónico inteligente basado en la integración de Inteligencia Artificial (IA) e Internet de las Cosas (IoT). Este sistema recopila datos en tiempo real de parámetros como pH, humedad y nutrientes, empleando algoritmos de aprendizaje automático para recomendar cultivos y realizar ajustes automatizados en los niveles de nutrientes. Entre los beneficios reportados destacan un incremento en la productividad, una reducción de hasta un 70% en el consumo de agua y una menor dependencia de mano de obra manual. Este antecedente respalda el enfoque de la presente investigación al demostrar cómo la combinación de IA y sensores IoT puede maximizar la eficiencia hídrica en sistemas hidropónicos inteligentes. Los conceptos de monitorización y ajuste automatizado son directamente aplicables al diseño propuesto en esta tesis. Sin embargo; el trabajo de Rahman et al. se orienta a contextos con alta inversión tecnológica, mientras que nuestra propuesta adapta este concepto a entornos rurales altoandinos, caracterizados por limitaciones de conectividad y recursos, priorizando la simplicidad operativa, la viabilidad económica y la sostenibilidad local.

Dbritto, G., & Hamdare, S. (2018). *An AI based system design to develop and monitor a hydroponic farm*. 2018 International Conference on Smart City and Emerging Technology (ICSCET), 1–5, Doi: 10.1109/ICSCET.2018.8537317.

Este estudio propone un sistema hidropónico automatizado que incorpora técnicas de inteligencia artificial para monitorear y ajustar parámetros esenciales como temperatura, pH, nutrientes y luz en un entorno cerrado. Utiliza una Raspberry Pi 3 y sensores para controlar la mezcla de agua y nutrientes directamente en las raíces de las plantas, con un experimento enfocado en el cultivo de tomates F1 Hybrid Suhyana. Además, compara su rendimiento con plantas cultivadas en suelo tradicional. Entre los beneficios encontrados destacan la conservación de agua y nutrientes, la mejora en los rendimientos agrícolas en un entorno hidropónico y la reducción de pérdidas por factores externos. Este antecedente es altamente relevante porque integra inteligencia artificial con tecnologías accesibles y eficientes, como Raspberry Pi y sensores, reforzando la viabilidad de un sistema cerrado para optimizar el uso del agua, un enfoque clave en la presente investigación para la provincia de Anta. Sin embargo; el estudio de Dbritto, G., & Hamdare, S. (2018) se centra en condiciones controladas y cultivos comerciales, sin considerar contextos rurales ni limitaciones hídricas reales. Nuestra propuesta amplía ese enfoque al implementar un sistema NFT basado en AIoT en fitotoldos altoandinos, adaptado a las necesidades locales y a la gestión eficiente del recurso hídrico.

Perwiratama, R., Setiadi, Y. K., & Suyoto. (2019). *Smart hydroponic farming with IoT-based climate and nutrient manipulation system*. 2019 International Conference of Artificial Intelligence and Information Technology (ICAIIIT), Doi: 10.1109/ICAIIIT.2019.8834533, 129–132.

Este artículo presenta un sistema hidropónico inteligente basado en IoT, diseñado para la manipulación automática de nutrientes y del clima en un invernadero. El sistema utiliza sensores (pH, temperatura, conductividad eléctrica, humedad, luz, nivel y flujo de agua) y algoritmos que ajustan en tiempo real las condiciones críticas del cultivo. Entre los beneficios reportados destacan la mayor precisión en el control de parámetros, la reducción de la intervención humana y el potencial de incrementar la productividad de los cultivos. La metodología de este antecedente valida el uso de sensores modernos y algoritmos avanzados para la automatización hidropónica, lo que refuerza la aplicabilidad de tecnologías similares en este proyecto de investigación para Mantoclla, Anta. No obstante, el enfoque de Perwiratama et al. (2019) se centra en contextos con infraestructura tecnológica, sin considerar limitaciones propias de zonas rurales. Nuestra propuesta amplía este concepto al adaptarlo a fitotoldos altoandinos, priorizando soluciones de bajo costo, simplicidad operativa y sostenibilidad local.

Van den Bemd, W. (2022). *Robust Deep Reinforcement Learning for Greenhouse Control and Crop Yield Optimization*. , W.J.G.M. Tue.nl. Recuperado el 5 de noviembre de 2024, de https://pure.tue.nl/ws/portalfiles/portal/211129129/Bemd_W.pdf

El estudio analiza el uso de algoritmos de aprendizaje por refuerzo, como SAC y PPO, en invernaderos hidropónicos para optimizar la producción de lechuga. Utiliza un simulador desarrollado en OpenAI Gym para entrenar modelos, mejorando la robustez del sistema frente a condiciones variables.

Resultados clave:

- a. Adaptabilidad de los modelos a entornos cambiantes.
- b. Incremento en la estabilidad y eficiencia del sistema.

Este antecedente respalda el uso de algoritmos de aprendizaje por refuerzo en entornos virtuales como OpenAI Gym para optimizar sistemas agrícolas. Su enfoque en robustez y adaptabilidad es particularmente relevante para el desarrollo del entorno de simulación propuesto en este proyecto, que busca entrenar modelos de inteligencia artificial antes de su implementación en un sistema hidropónico real.

An, Z., Cao, X., Yao, Y., Zhang, W., Li, L., Wang, Y., Guo, S., & Luo, D. (2021). *A simulator-based planning framework for optimizing autonomous greenhouse control strategy*. Proceedings of the International Conference on Automated Planning and Scheduling, 31, 436–444. Doi:10.1609/icaps.v31i1.15989.

Propone un marco de planificación basado en simuladores y algoritmos de IA, como SAC, para optimizar estrategias de control en invernaderos autónomos. Este marco incluye simulaciones precisas del clima y el crecimiento de tomates cherry, validándose con datos reales.

Resultados clave:

- a. Obtención de estrategias de control óptimas.
- b. Mayor sostenibilidad y rentabilidad en la producción agrícola.

Este antecedente valida el uso de simuladores en la planificación y optimización de sistemas agrícolas autónomos, alineándose con la necesidad de desarrollar un entorno virtual para entrenar modelos de IA en la presente investigación.

Aun cuando el estudio de An et al. (2021) demuestra el potencial de los simuladores para planificar estrategias óptimas, su aplicación se limita a invernaderos de alta tecnología. Nuestra investigación busca adaptar este enfoque a contextos rurales, donde los recursos son limitados y la implementación requiere soluciones más accesibles y replicables.

5.1.2. Antecedentes nacionales

Cayllahua Utani, Y. (2023). *Aplicación de un sistema de control basado en IoT para el balance de la solución nutritiva en el cultivo de lechuga por hidroponía en el Distrito de Chilca, Lima, 2021*. Universidad Nacional Micaela Bastidas de Apurímac.

Plantea un sistema de control basado en IoT para optimizar el balance de la solución nutritiva en cultivos hidropónicos de lechuga, utilizando sensores (pH, CE, temperatura, humedad) y actuadores (válvulas, bombas) conectados a una plataforma con Raspberry Pi y protocolos MQTT. El sistema se implementó en el Distrito de Chilca, Lima, y se validó mediante comparación con métodos tradicionales.

Resultados clave:

- a. Mejora productiva: Aumento de 819 gramos en el rendimiento por cosecha y ahorro de 9 litros de agua.
- b. Precisión en parámetros: Estabilidad en los rangos óptimos de pH (5.5–6.5) y CE (1.5–2.5 dS/m), con registros automatizados.
- c. Eficiencia operativa: Reducción del 75% en el tiempo de monitoreo (8 segundos vs. 4 minutos 22 segundos).

Este estudio valida la efectividad del IoT para la automatización en hidroponía, demostrando que la captura de datos en tiempo real y el control remoto mejoran la productividad y el uso eficiente de recursos. Los hallazgos se alinean con la necesidad de integrar tecnologías accesibles en la agricultura de precisión, especialmente en contextos con limitaciones hídricas o de suelo.

Mientras que el trabajo de Cayllahua Utani (2023) evidencia avances importantes en la automatización hidropónica con IoT, se enfoca principalmente en la eficiencia operativa sin incorporar modelos predictivos o aprendizaje automático. Nuestra propuesta busca superar esta limitación mediante la integración de inteligencia artificial para decisiones más autónomas y adaptativas en entornos rurales.

López, C. S., Machaca, W. M., Cerazo, L. B., Salazar, D. U., & Saravia, N. B. (2024). *IoT-based Smart Hydroponics Experimental Module in Lima, Peru*. *Nanotechnology Perceptions*, 20(s12), 1222–1234. <https://doi.org/10.62441/nano-ntp.v20is12.87>

Propone un sistema de hidroponía inteligente basado en IoT para optimizar el cultivo de lechugas en un ambiente controlado en Lima, Perú. Este sistema integra sensores de temperatura, pH y conductividad, una unidad de adquisición de datos (Arduino + ESP32) y una plataforma en la nube ("thinger.io") para monitoreo y control remoto en tiempo real.

Resultados clave:

- a. Cultivos de lechuga con un peso de hasta 745 gramos, superando significativamente los 350 gramos promedio del mercado local.
- b. Eficiencia en el uso de recursos, eliminando la necesidad de fertilizantes químicos y reduciendo el consumo de agua.

- c. Monitoreo automatizado y acceso remoto a datos críticos (pH, temperatura, conductividad) para una gestión precisa del cultivo.

Este antecedente demuestra la viabilidad de integrar tecnologías IoT en sistemas agrícolas para mejorar la productividad y sostenibilidad, respaldando el desarrollo de entornos controlados y automatizados en la agricultura moderna. Su enfoque en la adquisición de datos y el control remoto se alinea con la necesidad de sistemas inteligentes para optimizar la producción agrícola en condiciones urbanas o con recursos limitados.

Si bien el estudio de López et al. (2024) demuestra mejoras significativas en productividad mediante IoT, su enfoque se limita al monitoreo y control remoto, sin incorporar capacidades predictivas ni decisiones automatizadas basadas en IA. Nuestra investigación propone superar esta brecha mediante modelos inteligentes que anticipen y ajusten condiciones en tiempo real.

En la Tabla 1 se presenta un cuadro comparativo de antecedentes de investigaciones previas, organizado con los siguientes criterios: autor(es) y año, tecnología utilizada, parámetros monitoreados, cultivo estudiado y aportes principales. Este cuadro permite identificar las tendencias y contribuciones más relevantes en el ámbito de estudio.

Tabla 1:
Cuadro comparativo de antecedentes

Autor(es) / Año	Tecnología usada	Parámetros monitoreados	Cultivo	Aportes principales
Rahman et al. (2024)	AIoT, Random Forest, sensores	pH, humedad, nutrientes	No específico	Recomendación de cultivos y ajustes automáticos
Dbritto, G., & Hamdare, S. (2018).	IA (<i>K Nearest Neighbor</i>), Raspberry Pi, sensores	Temperatura, pH, nutrientes, luz	Tomate F1 Hybrid	Conservación de agua y nutrientes, mejora en rendimientos
Perwiratama et al. (2019)	IoT, sensores, algoritmos de control	pH, CE, temperatura, humedad	General	Automatización precisa, mejora del rendimiento
Van den Bemd (2024)	DRL (DQN, SAC, PPO), simulador (OpenAI Gym)	Parámetros ambientales (simulados)	Lechuga	Entrenamiento robusto en entornos virtuales
An et al. (2021)	Simuladores, SAC, IA	Clima y crecimiento (simulados)	Tomate cherry	Estrategias óptimas en simulación, sostenibilidad
Cayllahua (2023)	IoT, MQTT, Raspberry Pi	pH, CE, temperatura, humedad	Lechuga	Aumento en rendimiento y precisión, ahorro de agua
López et al. (2024)	IoT, Arduino, ESP32, Thingier.io	pH, temperatura, CE	Lechuga	Productividad elevada, monitoreo remoto eficiente

Fuente: Elaboración propia

5.2. Contexto agroclimático y productivo de la comunidad de Mantoclla

5.2.1. *Comunidad de Mantoclla y sus condiciones climáticas*

La comunidad campesina de Mantoclla, un centro poblado ubicado en el distrito de Anta, provincia de Anta, región Cusco, con una altitud aproximada de 3911 m s. n. m. (Ubigeo: 080301). Sus coordenadas geográficas son 13° 33' 16.5" S de latitud y 72° 10' 15.8" W de longitud, y se encuentra en la región altoandina del Perú (Deperu.com, 2025).

Esta comunidad cuenta con aproximadamente 291 familias comuneras, caracterizado por temporadas bien diferenciadas de lluvias y sequías (Mapcarta.com, 2025). Durante el año, las temperaturas oscilan entre 1 °C y 19 °C, con picos ocasionales que van desde -1 °C a 22 °C, dependiendo de la estación. Estas características reflejan un entorno mayoritariamente templado y fresco, con una marcada variabilidad en la nubosidad y la precipitación.

Además de acuerdo a la clasificación climática del Senamhi, en zonas ubicadas por encima de los 3 200 m s. n. m. —cómo es el caso de Mantoclla— predominan climas lluviosos con humedad deficiente en otoño e invierno, caracterizados por temperaturas frías, alta variabilidad térmica y estacionalidad hídrica. Estos climas suelen presentar inviernos secos y otoños con escasa precipitación, lo que genera condiciones propensas al déficit hídrico, especialmente durante la temporada seca (Senamhi, 2024).

La temporada de lluvias, que se extiende principalmente entre diciembre y marzo, coincide con los meses más nublados del año, donde el cielo está cubierto en promedio un 94 % del tiempo (Spark, 2025). Sin embargo; estas lluvias no siempre son suficientes para satisfacer las necesidades agrícolas debido a la falta de infraestructura adecuada para la captación y almacenamiento de agua. Además, durante la temporada seca, que abarca aproximadamente desde mayo hasta septiembre,

las condiciones climáticas son parcialmente nubladas y las precipitaciones son mínimas, lo que genera un déficit hídrico crítico en este período.

La falta de agua disponible durante los meses secos tiene un impacto significativo en la agricultura local, especialmente en cultivos sensibles al suministro hídrico constante, como papa, quinua, rábanos y otras hortalizas. Por otro lado, la alta variabilidad en las condiciones de nubosidad puede influir en la eficiencia del riego y el crecimiento de los cultivos, ya que afecta la temperatura y la evapotranspiración.

Estas características climáticas hacen que sea imprescindible implementar soluciones que optimicen el uso del agua en la agricultura, como los sistemas hidropónicos inteligentes. Este tipo de sistemas, que recirculan el agua y minimizan las pérdidas, pueden adaptarse eficazmente a las condiciones de Anta, ofreciendo una alternativa viable para mitigar los efectos de la escasez hídrica y mejorar la seguridad alimentaria local.

5.2.2. Fitotoldos en la Comunidad de Mantoclla y su Potencial Agrícola

En la comunidad altoandina de Mantoclla (Cusco), se han implementado fitotoldos (invernaderos rurales) siguiendo el modelo estandarizado por el Proyecto Qorichacra (Durán et al., 2016). Esta tecnología, diseñada para zonas sobre los 3,500 msnm, ha demostrado ser eficiente en la producción de hortalizas (como lechuga, fresa y acelga) bajo condiciones climáticas adversas (heladas, radiación UV intensa y vientos fuertes).

Características técnicas validadas

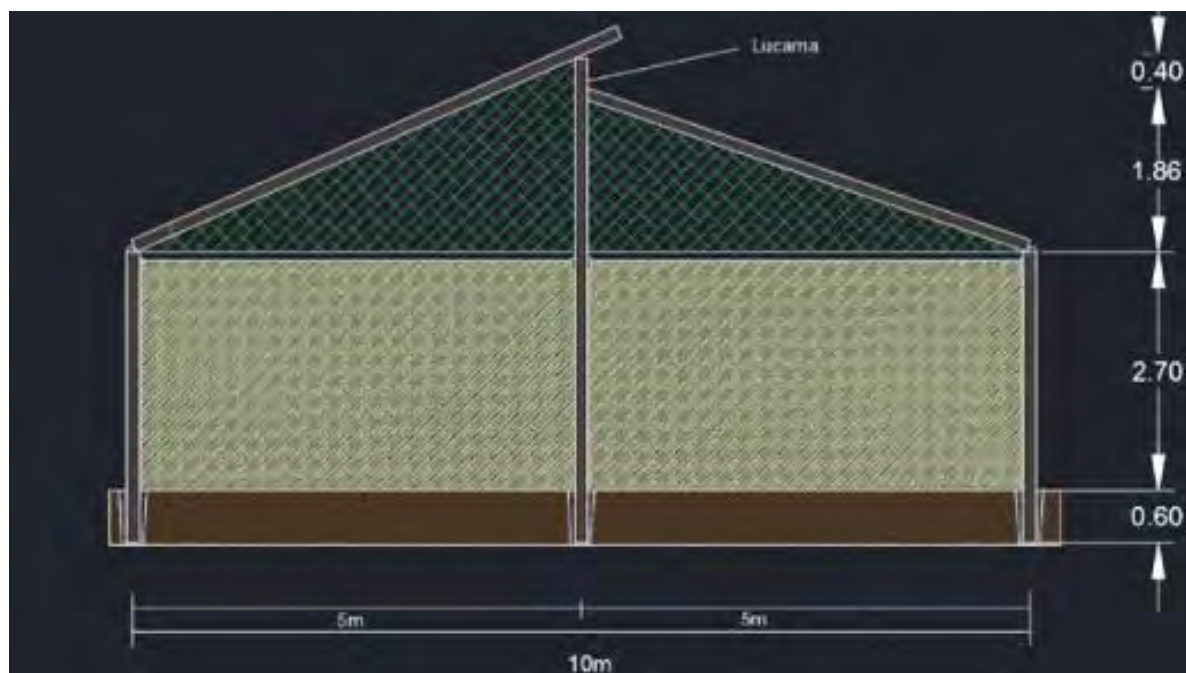
1. Diseño:

- Estructura tipo capilla con doble caída, construida con postes de eucalipto tratados con brea para resistir la humedad.
- Cubierta de plástico agrofilm (calibre 10, 254 micras), que optimiza la captación de luz solar y retención térmica nocturna.
- Ventanas laterales con malla raschell (65% sombra) para ventilación y control de plagas

Estas características y diseño se pueden observar en la Ilustración 1 y la Ilustración 2.

Ilustración 1:

Corte transversal de fitotoldo estándar



Fuente: (Qorichacra, 2016)

Ilustración 2:
Maqueta de fitotoldo tipo capilla



Fuente: (Qorichacra, 2016)

2. Manejo Agrícola:

- Riego por goteo e inundación con tanques elevados, asegurando un uso mejor del agua.
- Producir hasta 3 cosechas anuales de hortalizas.
- Reducir pérdidas por heladas y plagas.

Tabla 2:
Cuadro comparativo entre cultivo hidropónico y cultivo en suelo

Característica	Cultivo Hidropónico	Cultivo en Suelo
Rendimiento	Generalmente mayor (hasta un 30%) (Inveurop, 2025)	Generalmente menor
Consumo de Agua	Menor (hasta un 80% menos)	Mayor
Calidad del Suelo/Nutrientes	Controlado y optimizado	Depende de la calidad del suelo
Control de Plagas y Enfermedades	Menos susceptible a plagas y enfermedades	Más susceptible
Versatilidad	Limitada a ciertos cultivos (no tubérculos)	Puede cultivar una amplia variedad de cultivos
Uso de Fertilizantes	Necesita soluciones nutritivas específicas	Depende de la fertilización del suelo

Fuente: (Systems H. , 2022)

En la Tabla 2 se presenta un cuadro comparativo entre el cultivo hidropónico y el cultivo en suelo, considerando diferentes características que permiten evidenciar las ventajas y desventajas de cada sistema.

5.3. Descripción general de sistemas hidropónicos

En su estudio sobre la hidroponía, Gaikwad & Maitra (2020, citado en Rahman et al., 2024) destacan los múltiples beneficios de este método de cultivo, que incluyen una utilización eficiente de nutrientes y agua, optimización del espacio y un control preciso sobre el entorno de crecimiento. Los autores enfatizan la superioridad de los sistemas hidropónicos, particularmente el sistema NFT, en términos de producción de vegetales de alta calidad y productividad en comparación con los métodos agrícolas tradicionales. Identifican seis tipos de sistemas hidropónicos, siendo el NFT ampliamente utilizado para el cultivo de diversas hortalizas. Se emplean varios medios, como fibra de coco, perlita y cáscaras de arroz, para sostener las raíces de las plantas en sistemas hidropónicos. Mantener niveles óptimos de pH y TDS es crucial para un cultivo hidropónico exitoso.

En una descripción completa de los sistemas hidropónicos, Nisha et al. (2014, citado en Rahman et al., 2024) se refieren a la hidroponía como una alternativa a las prácticas agrícolas convencionales. Los autores discuten diferentes sistemas hidropónicos, sus funciones y adecuación para varias plantas. Además, el artículo presenta una revisión de investigaciones sobre el cultivo de hortalizas mediante sistemas hidropónicos y ofrece perspectivas sobre las prácticas de conservación de agua y el mercado global de la agricultura hidropónica.

En un análisis comparativo realizado por Singh et al. (2021, citado en Rahman et al., 2024), se estudiaron los patrones de crecimiento de plantas de trigo, espinaca y lirio durante un período de 2 meses en sistemas hidropónicos y de agua de grifo. El experimento reveló que el uso de la

solución de Hoagland, una solución de nutrientes formulada específicamente para el cultivo hidropónico de plantas, promovió un crecimiento más rápido en comparación con el agua de grifo. El crecimiento longitudinal de las plantas indicó que el sistema hidropónico resultó en un desarrollo acelerado de las plantas en comparación con el agua de grifo.

Los sistemas de Agricultura en Entornos Controlados (CEA), que emplean tecnologías avanzadas como inteligencia artificial y aprendizaje automático para optimizar el crecimiento de las plantas, han sido discutidos por Srivani y sus colegas. Los autores evaluaron diferentes técnicas hidropónicas utilizadas en sistemas CEA, incluyendo el sistema de Mecha, Ebb and Flow, Drip, DWC (Cultura en Agua Profunda), NFT y Aeroponía. El estudio también abordó desafíos clave en CEA con hidroponía, tales como optimización de energía, conservación y reciclaje de agua y gestión de plagas.

En otro experimento, Wiangsamut et al. (2021, citado en Rahman et al., 2024) investigaron el impacto del espaciamiento de plantas en sistemas hidropónicos sobre el crecimiento de cuatro especies de hortalizas. El repollo Tokyo Bekana presentó la mayor densidad de plantas y rendimiento fresco, mientras que el Coral Rojo tuvo el más bajo. El sistema DFT10x12 resultó en rendimientos significativamente más altos y el mayor beneficio bruto en la producción de vegetales, excepto para el Coral Rojo. El estudio estableció correlaciones entre el rendimiento fresco y los parámetros de las plantas mediante análisis estadístico.

Para abordar los desafíos de seguridad alimentaria, un estudio centrado en el cultivo hidropónico de lechuga en Uganda exploró las respuestas fisiognómicas de la lechuga a técnicas hidropónicas. La investigación buscó evaluar la tasa de crecimiento, la estructura de las hojas y la absorción de nutrientes de la lechuga en sistemas hidropónicos, brindando perspectivas sobre la

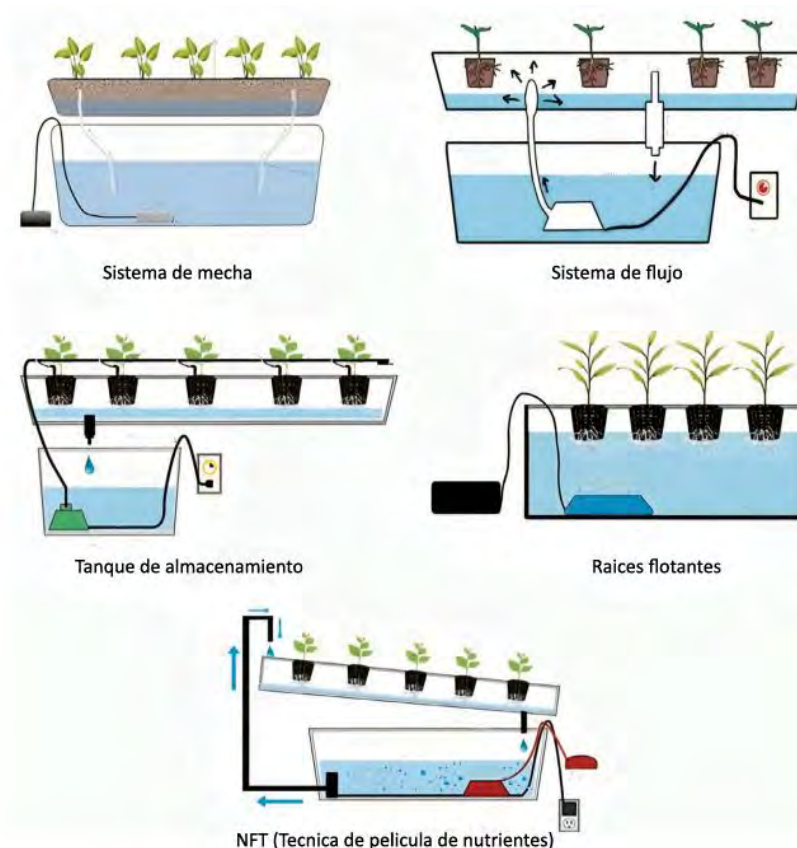
adaptabilidad de la lechuga a la hidroponía en Uganda. Los hallazgos tienen implicaciones más allá de Uganda, ofreciendo conocimiento valioso para áreas urbanas a nivel mundial que enfrentan problemas similares de seguridad alimentaria.

5.3.1. Tipos de sistemas hidropónicos

En la Ilustración 3 se muestran varias técnicas de sistemas hidropónicos que se han utilizado en diversos estudios. La revisión de la literatura en esta sección cubre los beneficios y desafíos de los sistemas hidropónicos para el cultivo, incluyendo diversas técnicas y medios utilizados para el crecimiento de plantas. La hidroponía ofrece el uso eficiente de nutrientes y agua, conservación de espacio y control ambiental.

Ilustración 3:

Técnicas en hidroponía



Fuente: (Rahman, 2024)

Diversos cultivos como trigo, espinaca, lirio de agua, arroz, lechuga y tomates han sido estudiados por su desempeño en sistemas hidropónicos. La hidroponía se considera una alternativa potencial a las prácticas agrícolas convencionales que provocan degradación ambiental, especialmente en áreas urbanas e industrializadas.

Tecnologías avanzadas; como la inteligencia artificial y el aprendizaje automático, se están integrando en la agricultura hidropónica para optimizar el crecimiento de las plantas y abordar desafíos como: La optimización de energía, el ahorro, reciclaje de agua y la gestión de plagas. Los sistemas hidropónicos pueden proporcionar una agricultura sostenible y libre de pesticidas, al tiempo que mejoran la salud y calidad de los cultivos.

Sistema NFT.

Los sistemas Hidropónicos NFT, abreviatura de *Nutrient Film Technique* (Técnica de Película de Nutrientes), es una variante del sistema hidropónico. Esta técnica funciona impulsando agua rica en nutrientes en una fina capa sobre las raíces de las plantas. Diseñada para operar dentro de canales o conductos específicos con ligeras inclinaciones, facilita la recirculación continua hacia su depósito de origen. Las plantas mediante NFT suelen colocarse en vasos de malla o macetas ubicados estratégicamente dentro de dichos canales. Al proporcionar acceso directo a nutrientes esenciales a través de un flujo constante recirculante, en lugar de rellenos repetidos, no solo es eficiente en el uso de recursos como nutrientes y agua. Sino que fomenta un entorno rico en oxígeno alrededor de las raíces, promoviendo su crecimiento rápido y saludable.

Los componentes principales de un sistema hidropónico de Técnica de Película de Nutrientes (NFT) son los siguientes:

Canales: Generalmente fabricados de plástico, actúan como la estructura principal de un sistema NFT. Están diseñados con una ligera inclinación para facilitar el flujo descendente de los nutrientes hacia el depósito de origen.

- Depósito de solución nutritiva: Es un contenedor que almacena la solución acuosa rica en nutrientes para alimentar a las plantas.
- Bomba: Este dispositivo bombea la mezcla de nutrientes desde el depósito a través de diversos conductos o canales que rodean las raíces de las plantas. Integrados en el sistema, se encuentran piedras de aire que no solo oxigenan la mezcla de nutrientes, sino que también facilitan la aireación de las raíces. Estas piedras generan pequeñas burbujas en la solución, contribuyendo significativamente a aumentar los niveles de oxígeno disuelto en el líquido.
- Vasos de malla o macetas: Estos contenedores se utilizan para mantener las plantas en su lugar, permitiendo que sus raíces entren en contacto con la solución nutritiva. Generalmente, se suspenden dentro de los canales o conductos.
- Temporizador: El temporizador regula la bomba, asegurando que la solución nutritiva fluya sobre las raíces de las plantas a intervalos específicos.
- Medidores de pH y EC (Conductividad Eléctrica): Estos dispositivos se emplean para monitorear y mantener niveles óptimos de pH y concentración de nutrientes en la solución, factores cruciales para el crecimiento óptimo de las plantas. En este caso, se utilizan sensores para recopilar datos sobre factores como pH y EC para un monitoreo continuo.

- Iluminación: Aunque no es esencial, se puede agregar iluminación complementaria al sistema NFT para garantizar que las plantas reciban luz para la fotosíntesis, especialmente en entornos interiores o áreas con luz natural limitada.

Estos componentes trabajan en conjunto de manera armoniosa para construir un sistema hidropónico que es a la vez sencillo y eficaz. Particularmente adecuado para cultivar una variedad de plantas cuyas raíces no se extienden a mucha profundidad.

5.3.2. Comparación del sistema NFT con otros métodos hidropónicos

El sistema NFT (*Nutrient Film Technique*) es uno de los métodos hidropónicos más utilizados por su bajo consumo de agua, eficiencia en el uso de nutrientes y simplicidad en la construcción. Consiste en hacer circular una película delgada de solución nutritiva por canales inclinados, donde las raíces de las plantas absorben los nutrientes necesarios mientras permanecen parcialmente expuestas al aire (Repsol, 2025).

Ventajas del sistema NFT:

- Eficiencia hídrica: Usa menos agua que otros sistemas como el de raíz flotante, gracias a la recirculación constante.
- Mayor oxigenación de raíces: Las raíces están expuestas al oxígeno atmosférico, favoreciendo el desarrollo radicular y reduciendo el riesgo de enfermedades por hipoxia.
- Diseño modular: Es fácil de escalar y mantener, lo que lo hace ideal para espacios reducidos.

Desventajas:

- Alta dependencia energética: Si se detiene la bomba por fallas eléctricas, las raíces se secan rápidamente, afectando el cultivo.

- No es apto para plantas de gran tamaño o ciclo largo, ya que el sistema puede colapsar bajo mucho peso o si las raíces obstruyen el canal.

Comparación con otros sistemas:

- Sistema de raíz flotante: Consiste en mantener las raíces sumergidas en una solución nutritiva. Aunque es más estable ante cortes de energía, consume más agua y puede generar zonas anaeróbicas si no se airea adecuadamente.
- Sistema de goteo recirculante: Usa goteros para alimentar directamente a cada planta. Es más flexible para cultivos de gran tamaño, pero requiere mayor complejidad en el sistema de distribución y mantenimiento.
- Aeroponía: Las raíces se suspenden en el aire y se rocían con solución nutritiva. Aunque ofrece la mayor eficiencia en el uso de agua y oxígeno, su costo y complejidad técnica son elevados, lo que limita su adopción en contextos rurales o de bajos recursos.

En contextos como las zonas altoandinas donde los recursos son limitados y las condiciones climáticas pueden ser extremas, el sistema NFT representa un equilibrio entre eficiencia, simplicidad y bajo costo, haciéndolo una alternativa viable frente a otras técnicas más complejas.

En la Tabla 3 se presenta una comparación de diferentes sistemas hidropónicos, considerando su tipo, descripción, principales ventajas, desventajas y los cultivos más comunes en cada uno de ellos. Esta información permite analizar la aplicabilidad de cada sistema según las necesidades del cultivo.

Tabla 3:
Comparación de diferentes sistemas hidropónicos

Tipo de Sistema	Descripción	Ventajas	Desventajas	Cultivos Comunes
Técnica de película de nutrientes (NFT)	Una fina película de solución nutritiva fluye continuamente sobre las raíces de las plantas.	Uso eficiente de nutrientes y agua; mantenimiento sencillo.	Susceptible a fallas de la bomba; no apto para plantas grandes.	Hortalizas de hoja, hierbas, fresas.
Cultivo en agua profunda (DWC)	Las raíces de las plantas están sumergidas en una solución rica en nutrientes, con oxígeno suministrado por bombas de aire.	Alta oxigenación; crecimiento rápido; fácil de instalar.	Limitado a plantas pequeñas; riesgo de pudrición de raíces.	Lechuga, espinaca, albahaca.
Aeroponía	Las raíces de las plantas están suspendidas en el aire y se rocían con solución nutritiva.	Alta oxigenación; uso eficiente de agua y nutrientes; crecimiento rápido.	Alto costo inicial; mantenimiento complejo; riesgo en cortes de energía.	Hierbas, hortalizas de hoja, fresas.
Sistema de agricultura vertical	Apilamiento de múltiples capas de sistemas hidropónicos de forma vertical para maximizar el uso del espacio.	Máximo aprovechamiento del espacio; ideal para entornos urbanos; escalable.	Altos costos de instalación y operación; requiere control ambiental preciso.	Hortalizas de hoja, hierbas, microverdes.

Fuente: Elaboración propia

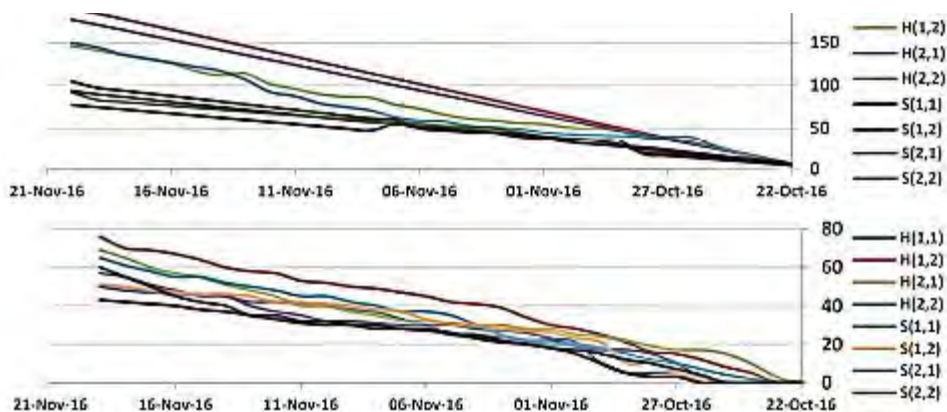
5.3.3. Comparación entre el sistema tradicional de cultivo en suelo y el sistema de cultivo hidropónico.

En un experimento comparativo realizado por Gashgari et al. (2018, citado en Rahman et al., 2024), se analizó el crecimiento de plantas de pepino armenio tanto en sistemas hidropónicos como en sistema de suelo tradicional.

Aquí, las semillas de pepino están categorizadas por tipo y numeradas secuencialmente [H(1,1) para semillas de pepino en condición hidropónica, H(2,1) para semillas de pepino americano; S representa el sistema basado en suelo]. La investigación se centró en identificar cómo los diferentes tipos de semillas y sistemas de plantación influyen en la altura de la planta y la extensión de las hojas. Tras realizar un ANOVA (Análisis de Varianza), se estableció que las plantas en sistemas hidropónicos mostraron un aumento significativo en altura en comparación con sus contrapartes en suelo, como se ilustra en la Ilustración 4. Sin embargo; no se halló variación significativa en la longitud de las hojas entre ambos sistemas. Estos hallazgos respaldan la hipótesis de que los sistemas hidropónicos superan a los de suelo en términos de crecimiento de plantas.

Ilustración 4:

Crecimiento de plantas y de sus hojas – observación de 30 días



Fuente: (Rahman, 2024)

En un estudio de 2015 que comparó la producción de lechuga en un sistema hidropónico con métodos agrícolas convencionales en el suroeste de Arizona. Los investigadores encontraron que, el sistema hidropónico producía 11 veces más lechuga utilizando menos agua.

Si bien la agricultura hidropónica requiere algo más de energía, los resultados apuntan a que este sistema tiene el potencial de ofrecer mayores rendimientos de cultivos y una excelente eficiencia en el uso del agua en comparación con la agricultura tradicional. Concentrar esfuerzos en reducir el consumo energético mediante una mayor eficiencia y la combinación con fuentes de energía renovable allanaría el camino hacia una práctica sostenible.

AlShrouf (2017, citado en Rahman et al., 2024) subraya la importancia de técnicas de producción de alimentos más eficientes para satisfacer a una población en crecimiento.

El autor destaca las ventajas de métodos agrícolas contemporáneos como la hidroponía, la aeroponía y la acuaponía, los cuales permiten mayores volúmenes de cultivo, menos uso de agua y cultivo continuo mediante una solución rica en nutrientes en lugar de suelo. El uso de tecnologías de agricultura de precisión, como: sensores, automatización y aplicaciones móviles, mejora el control de los agricultores y promueve la sostenibilidad. El cultivo hidropónico, debido a su menor uso de agua y tierra en comparación con los métodos agrícolas convencionales, ha demostrado ser efectivo utilizando 10-25 kg/m³ de agua. No solo emplea considerablemente menos agua que los procesos agrícolas basados en suelo, sino que también aumenta la productividad en general.

Una investigación realizada en Cachemira, India, evaluó el impacto de la cultura en agua profunda, la técnica de película de nutrientes y el cultivo en suelo tradicional en el crecimiento de la lechuga, así como las implicaciones financieras en relación con la radiación solar.

La cultura en agua profunda mostró una maduración rápida y rendimientos abundantes, sin embargo; el cultivo en suelo presentó mayor dispersión de plantas y superficie foliar. La técnica de película de nutrientes arrojó los resultados menos productivos. El estudio indicó que los sistemas hidropónicos, en particular la cultura en agua profunda, son una alternativa sostenible al cultivo convencional de lechuga, ofreciendo múltiples cosechas al año y ahorro de agua. La adopción de sistemas hidropónicos en regiones templadas podría acelerarse gracias a su viabilidad comercial, y futuras investigaciones podrían explorar el cultivo hidropónico vertical y la automatización.

Gurung et al. (2019, citado en Rahman et al., 2024) descubrieron que las plantas hidropónicas crecen más rápido y producen mayores rendimientos que las plantas cultivadas en suelo, siendo la solución de Hoagland la más efectiva en nutrientes.

El pH del medio controla en gran medida la absorción de nutrientes, y los medios líquidos son adecuados para plántulas, mientras que los medios sólidos son necesarios para la maduración completa. Se descubrió que, los sistemas hidropónicos son más productivos que el cultivo en suelo convencional, la lechuga hidropónica tenía la misma calidad que las lechugas orgánicas y de campo. La hidroponía permite un alto control de las plantas con bajo mantenimiento y baja contaminación de los cultivos, siendo importante para la seguridad alimentaria global.

Según estudios revisados; es evidente que, la agricultura hidropónica presenta numerosas ventajas sobre la agricultura tradicional.

La hidroponía proporciona mayor rendimiento, eficiencia en el uso de agua y producción continua. La producción hidropónica de tomate tiene una eficiencia en el uso del agua de 10-25 kg/m³, con sistemas cerrados que ofrecen mayor eficiencia que los sistemas abiertos. Los estudios

sugieren que, la lechuga hidropónica tiene calidad, textura, olor y sabor similares a las lechugas orgánicas cultivadas en campo. Sin embargo; la viabilidad de la agricultura hidropónica depende de factores como la disponibilidad de agua, tierra, el apoyo gubernamental comunitario, y la rentabilidad de las nuevas tecnologías. Si se logrará reducir el consumo energético mediante una mayor eficiencia y el uso de fuentes de energía renovable, la hidroponía podría ofrecer una solución sostenible para alimentar a la creciente población mundial.

5.3.4. Sistema hidropónico en relación a la escasez hídrica

Rahman et al. (2024), afirma que en comparación con la agricultura tradicional basada en el suelo, los sistemas hidropónicos ofrecen varias ventajas. Por ejemplo, la hidroponía puede reducir el uso de agua hasta en un 70 % en comparación con los métodos agrícolas tradicionales, ya que la solución nutritiva se recicla y puede ser monitoreada para un uso óptimo del agua.

Dbritto, G., & Hamdare, S. (2018). Comenta que los sistemas hidropónicos utilizan significativamente menos agua en comparación con la agricultura tradicional en suelo. Esto se logra gracias al uso eficiente y controlado de la mezcla de agua y solución nutritiva, la cual se administra directamente a las raíces de las plantas. Al evitar el desperdicio típico asociado con el riego en suelo, este enfoque permite una mayor conservación del recurso hídrico mientras se optimizan las condiciones de crecimiento para los cultivos de tomate F1 Suhyana.

5.4. Parámetros clave en hidroponía

En hidroponía, los parámetros clave como la conductividad eléctrica (CE), el pH, la temperatura y el nivel de agua son fundamentales para asegurar un crecimiento saludable y óptimo de las plantas. La importancia de cada uno radica en su impacto directo en la absorción de nutrientes, la fotosíntesis y el metabolismo de las plantas.

5.4.1. Conductividad eléctrica (EC).

La cantidad de sales solubles totales o nutrientes solubles (o iones) presentes en un medio de cultivo está determinada por la conductividad eléctrica (EC). La medición del nivel de EC de la solución nutritiva se realiza para evaluar el nivel de reposición de nutrientes necesario para reconstituir la solución antes de su consumo (Atami, 2025). La fuerza de la solución nutritiva se puede inferir indirectamente de la EC. Los valores más altos de EC en la solución nutritiva tienen un impacto en la salud y rendimiento de la planta, ya que aumenta la presión osmótica que afecta la absorción de nutrientes por las raíces de la planta.

En la hidroponía orgánica, se han observado valores más bajos de EC en una solución nutritiva orgánica en comparación con una solución nutritiva basada en químicos debido a la continua entrada de nutrientes provocada por la digestión de compuestos orgánicos y la nitrificación del bioreactor. EC también se utiliza para clasificar los materiales que se pueden emplear como sustratos en sistemas sin suelo. Se prefieren los sustratos con contenido nutricional establecido y valores bajos de EC. Los sustratos con niveles altos de EC implican la existencia de iones, que, aunque no son esenciales como nutrientes, pueden tener un impacto significativo en la compatibilidad de los sustratos en hidroponía.

Importancia de EC (conductividad eléctrica) en sistemas hidropónicos.

Sahare et al. Describe el desarrollo de un sistema hidropónico para el cultivo de tomate cherry, en el cual se utiliza la conductividad eléctrica como un indicador clave. La conductividad eléctrica permite medir con precisión la concentración de nutrientes en la solución hidropónica, asegurando que las plantas reciban el nivel adecuado de nutrientes. Así, se convierte en el parámetro principal de monitoreo del sistema, ya que facilita un control constante de la calidad y balance de la solución nutritiva, optimizando el crecimiento y salud de las plantas.

5.4.2. Nivel de pH.

Es útil tener una comprensión fundamental del pH al operar sistemas hidropónicos. El pH de una solución refleja cuán ácida o básica es en una escala de 1 a 14. Cualquier cosa con un valor de pH superior a 7 se considera básica; cualquier cosa con un valor de pH inferior a 7 se considera ácida, y un valor de pH de 7 se considera neutral (Atami, 2025). El pH de una solución está determinado por la cantidad de iones de hidrógeno (H^+), cuanto mayor es la cantidad, más ácida es la solución. En un sistema hidropónico, la regulación del pH es crucial para mantener un sistema saludable con buena disponibilidad de nutrientes.

Tanto la nitrificación como la absorción de nitrógeno por las plantas afectan la dinámica del pH en sistemas hidropónicos que utilizan digestato de biogás como fuente de nutrientes. Los factores que afectan la acumulación de nitrito en reactores nitrificantes con cultivos mixtos incluyen el nivel de pH. En condiciones óptimas con un pH de 8 y un DO de 1.5 a 30 °C, hasta el 77% del amoníaco eliminado se acumuló en nitrito. Las plantas pueden obtener nutrientes cuando hay una variedad de microorganismos presentes, como bacterias nitrificantes, lo cual no es factible en la hidroponía convencional, que depende únicamente del nivel de pH para permitir la disponibilidad de nutrientes para las plantas. Similar a otros microorganismos basados en suelo, muchos de estos microbios funcionan en un amplio rango de valores de pH, como las bacterias nitrificantes, que tienen un rango de pH de 6.5 a 8.0.

Importancia del pH en sistemas hidropónicos.

Los nutrientes se disuelven de manera diferente según el nivel de pH del agua. Cuando el pH es demasiado alto o demasiado bajo, algunos nutrientes se vuelven menos solubles, lo que dificulta que las plantas los absorban. Al mantener el pH en el rango ideal, los jardineros

hidropónicos aseguran que los nutrientes se disuelvan bien, lo que facilita que las plantas los aprovechen al máximo (Systems W. , 2025).

Otros parámetros.

5.4.3. Temperatura

La temperatura afecta directamente el crecimiento y desarrollo de las plantas. En un sistema hidropónico, los cambios de temperatura en la solución nutritiva pueden estresar a las plantas y llevar a enfermedades. El estrés por altas temperaturas generalmente resulta en alteraciones fisiológicas y reducción del rendimiento en las plantas a través de una variedad de alteraciones fisiológicas y bioquímicas en el metabolismo de las plantas, como la desnaturalización de proteínas y la alteración de la integridad de las membranas (Biologicals, 2023). Por otro lado, las bajas temperaturas inhiben la oxidación bacteriana, lo que lleva a la acumulación dentro de la planta que puede causar efectos tóxicos y daño a la biomasa aérea y al sistema de raíces. Las bajas temperaturas también impiden la asimilación de K y P y la translocación de P a nivel de las raíces.

La temperatura del agua influye en los parámetros operativos de la hidroponía orgánica. La temperatura afecta tanto el nivel de DO como el amoníaco en una solución nutritiva orgánica, con temperaturas más altas produciendo niveles de oxígeno más bajos y más amoníaco unionizado. Las altas temperaturas también podrían inhibir la absorción de calcio en las plantas.

5.5. Parámetros agronómicos clave para el cultivo de rábanos en sistemas hidropónicos

Según el Manual de Hidroponía publicado por la Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación de México. El rábano (*Raphanus sativus*) es una hortaliza de raíz de ciclo corto, ampliamente adaptada a sistemas hidropónicos debido a su rápido desarrollo

y bajo requerimiento estructural (Aquino, 2024). Para lograr un cultivo eficiente y de alta calidad en hidroponía, es fundamental mantener ciertos parámetros dentro de rangos óptimos que favorezcan el desarrollo del bulbo y eviten el estrés fisiológico como se observan en la Tabla 4.

Tabla 4:
Parámetros y rangos óptimos para el cultivo de rábano

Parámetro	Rango óptimo
Ciclo de cultivo	Varía según la variedad, generalmente 20-70 días
EC/TDS	850-950 ppm
Fertilización	Aplicar abono orgánico y/o químico equilibrado
Luz	Sol pleno o media sombra
pH	5.5 - 6.8
Riego	Regular, manteniendo el suelo húmedo, pero no encharcado
Suelo	Franco arenoso, bien drenado, con buen contenido de materia orgánica
Temperatura	15-22 °C

Fuente: (Aquino, 2024)

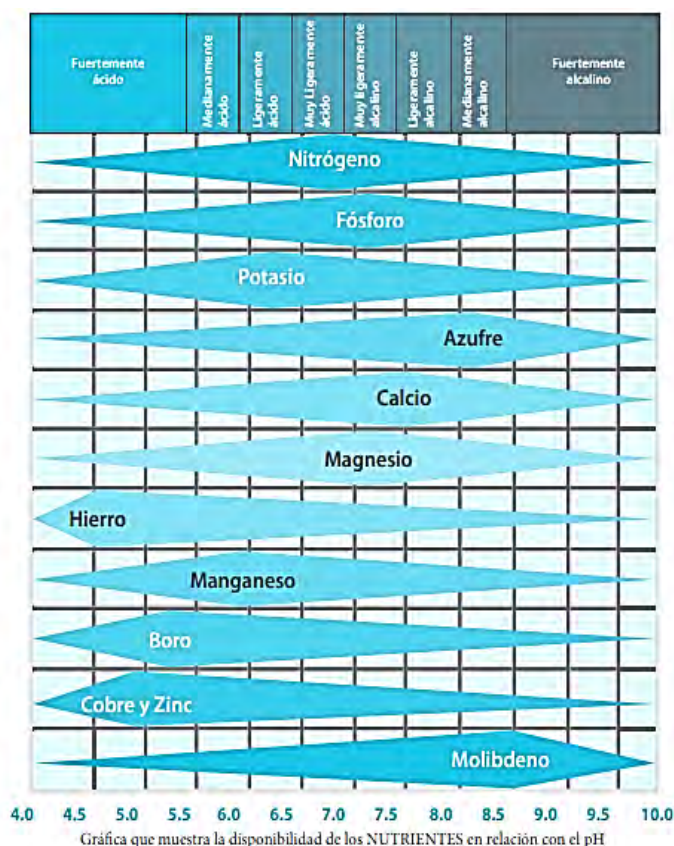
5.5.1. Parámetros fisicoquímicos de la solución nutritiva

Ilustración 5:

Intervalos de pH adecuados para diversas hortalizas y a disponibilidad de los nutrientes en relación con el pH

Hortaliza	Intervalos de pH
Apio	6.0-7.0
Berenjena	5.5-6.0
Betabel	6.0-7.0
Calabaza	5.5-6.5
Camote	5.8-5.8
Cebolla	6.0-6.5
Chícharo	6.0-7.0
Col	5.8-7.0
Coliflor	6.0-7.0
Espárrago	6.0-7.0
Espinaca	6.0-7.0
Fresa	5.3-6.5
Frijol ejotero	5.4-6.9
Jitomate	5.5-6.8
Lechuga	6.0-7.0
Melón	5.9-8.0
Nabo	5.5-6.5
Papa	5.0-5.4
Pepino	5.5-5.8
Rábano	5.5-6.5
Sandía	5.0-5.5
Verdolaga	6.5-8.0
Zanahoria	5.8-7.0

Fuentes: National Plant Food Institute. Manual de fertilizantes. LIMUSA, México, D.F., 1984; Raymond, D. Cultivo práctico de hortalizas. CECSA, México, D.F. 1975



Fuente: (Aquino, 2024)

Los parámetros fisicoquímicos para rábanos se pueden observar en la Ilustración 5.

- pH: El rango ideal se sitúa entre 5.5 y 6.5, ligeramente ácido, no tolera la salinidad. Prefiere los climas templados, teniendo en cuenta que hay que proteger al cultivo durante las épocas de elevadas temperaturas (Rural, 2023).
- Conductividad eléctrica (CE): Se recomienda una CE entre 850 ppm y 950 ppm, ajustándola de acuerdo con la etapa fenológica. En etapas iniciales se debe usar una CE menor (~1.5 mS/cm), aumentando gradualmente conforme se desarrolla el bulbo.

- Temperatura de la solución: El rango óptimo está entre 18°C y 22°C, lo que permite un desarrollo adecuado de raíces sin generar estrés hídrico o térmico.

5.5.2. Condiciones ambientales

- Temperatura ambiente: Se recomienda mantenerla entre 15°C y 22°C, evitando temperaturas superiores que puedan inducir raíces fibrosas o malformaciones.
- Humedad relativa: Un rango entre 60% y 70% es adecuado para mantener la transpiración equilibrada y prevenir enfermedades fúngicas.
- Iluminación: Es necesario asegurar entre 6 y 8 horas de luz diaria, ya sea natural o artificial con espectro adecuado, para mantener un desarrollo constante.

5.5.3. Requerimientos nutricionales

Los rábanos necesitan una solución nutritiva balanceada en macronutrientes (N-P-K) y micronutrientes esenciales (Ca, Mg, Fe, Zn, entre otros). Se recomienda una fórmula adaptada a hortalizas de raíz, con énfasis en un ligero aumento de potasio (K) para favorecer la formación del bulbo y la firmeza del tejido vegetal.

5.5.4. Sustrato de cultivo

Para el soporte de las plantas se utilizó un sustrato compuesto por menudencia de arroz (cáscara molida y residuos finos del pulido del grano), el cual actúa como un sustrato orgánico de tipo inerte similar a la fibra de coco, perteneciente al grupo de agregados en sistemas hidropónicos.

Este material fue seleccionado por su capacidad de retención de humedad, baja densidad y disponibilidad local, contribuyendo a conservar el agua dentro del sistema hidropónico y reducir pérdidas por evaporación.

La menudencia de arroz se colocó en los recipientes de cada planta (vasos de 300 mL perforados) sobre una base de malla plástica, permitiendo la aireación de las raíces y evitando el encharcamiento.

Se recomienda su reemplazo completo cada dos ciclos de cultivo (aproximadamente cada 60–70 días) o cuando se observe compactación excesiva, acumulación de sales o descomposición orgánica, factores que pueden alterar el pH o la conductividad eléctrica de la solución nutritiva.

Antes de cada reutilización, el material debe lavarse con agua limpia y neutralizarse con una solución suave de bicarbonato para eliminar residuos ácidos o salinos.

5.5.5. *Sistema hidropónico recomendado*

Los sistemas más adecuados para este cultivo son el NFT (*Nutrient Film Technique*), debido a su eficiencia hídrica, oxigenación y aquellos basados en sustratos inertes como la perlita o fibra de coco, los cuales ofrecen buena retención de humedad y soporte para el desarrollo radicular.

5.5.6. *Problemas comunes y soluciones*

- Raíces pequeñas o deformes: Asociadas a deficiencia de potasio, pH inadecuado o temperaturas elevadas.
- Hojas amarillas: Puede ser consecuencia de carencia de nitrógeno o hierro.
- Exceso de follaje sin engrosamiento del bulbo: Generalmente causado por exceso de nitrógeno.

5.5.7. *Tiempo estimado de cosecha*

El rábano se puede cosechar entre 25 y 35 días después de la siembra, dependiendo de la variedad y las condiciones ambientales y nutricionales mantenidas durante el cultivo.

Conclusión:

El cultivo hidropónico de rábanos representa una opción eficiente y de rápido retorno si se mantiene un control estricto sobre los parámetros de pH, CE, temperatura y nutrición. Esta especie es ideal para validar sistemas inteligentes como los basados en AIoT, gracias a su ciclo corto y sensibilidad a las condiciones de cultivo.

5.6. Inteligencia artificial y aprendizaje por refuerzo profundo para la automatización de parámetros agrícolas.

5.6.1. *Aprendizaje automático en la agricultura*

El Aprendizaje Automático se ha convertido en un tema de interés en muchas áreas de investigación, y la agricultura no es una excepción. Dado que, el Aprendizaje Automático es un tema amplio, los modelos utilizados en agricultura comienzan desde tareas simples de regresión y clasificación, pero también incluyen diversas estructuras de redes neuronales que se utilizan. Por ejemplo, en la automatización de tareas. Los diversos casos de uso agrícola se resumen en esta sección.

Dbritto, G., & Hamdare, S. (2018). desarrollaron un sistema hidropónico automatizado que integra inteligencia artificial y una Raspberry Pi para monitorear y ajustar parámetros críticos como temperatura, pH, nutrientes y luz en un entorno cerrado. Su experimento, aplicado al cultivo de tomates híbridos, evidenció beneficios como el ahorro de agua y nutrientes, mayor rendimiento

y reducción de pérdidas externas, validando la viabilidad de sistemas cerrados con IA en la agricultura.

Rahman et al. (2024) propusieron un sistema hidropónico inteligente basado en la combinación de inteligencia artificial e Internet de las Cosas, que recopila datos en tiempo real sobre pH, humedad y nutrientes. A través de algoritmos de aprendizaje automático, el sistema recomienda cultivos y ajusta de manera autónoma la solución nutritiva, logrando incrementos productivos, hasta un 70% de ahorro de agua y menor dependencia de mano de obra manual.

Perwiratama et al. (2019) diseñaron un sistema hidropónico inteligente con manipulación automática de nutrientes y condiciones climáticas en invernaderos mediante sensores y algoritmos de control. El uso de IoT permitió regular pH, temperatura y conductividad eléctrica en tiempo real, lo que aumentó la precisión de los parámetros y redujo la intervención humana, evidenciando el impacto positivo de la automatización en la productividad agrícola.

Van den Bemd (2022) investigó el uso de algoritmos de aprendizaje por refuerzo profundo, como SAC y PPO, aplicados en simuladores de invernaderos para optimizar el rendimiento de cultivos como la lechuga. Su estudio demostró la capacidad de estos modelos para adaptarse a condiciones cambiantes, mejorar la estabilidad y eficiencia del sistema, destacando la relevancia de la simulación en la agricultura de precisión.

An et al. (2021) desarrollaron un marco de planificación agrícola basado en simuladores y algoritmos de inteligencia artificial, particularmente SAC, para optimizar estrategias de control en invernaderos autónomos. Validado con datos de tomates cherry, el modelo permitió obtener estrategias de control óptimas que favorecieron la sostenibilidad y rentabilidad, reforzando la

importancia de los entornos virtuales como etapa previa a la implementación real en agricultura inteligente.

5.6.2. *Técnicas de aprendizaje por refuerzo*

En la sección anterior, se han presentado diferentes métodos de aprendizaje por refuerzo para diversos casos de uso. Sin embargo; un resumen compacto de los diferentes modelos permite evaluar las técnicas más prevalentes en la investigación agrícola actual. DQN es el enfoque más común para resolver tareas de aprendizaje por refuerzo. Es adecuado para muchas tareas, como: el control de energía en invernaderos, el control de un brazo robótico o la recomendación de órdenes de siembra y esquemas de riego. Sin embargo; a menudo, los DQNs se combinan con otras técnicas para facilitar un aprendizaje más rápido mediante la exploración eficiente del espacio de estados o la recolección de mayores recompensas, lo que produce mejores políticas.

En situaciones dependientes de series temporales, las RNNs se conectan comúnmente a los agentes DQN, ya que permiten retener un recuerdo de eventos pasados. Para tareas de procesamiento de imágenes, las CNNs han demostrado ser fiables, por ejemplo, en la detección de anomalías, donde el agente decide cómo actuar de la mejor manera ante una anomalía. Los métodos actor-crítico, como SAC y PPO, se utilizan para optimizar las políticas aprendidas. La Ilustración 6, resume la prueba de estos algoritmos con el objetivo de encontrar la más adecuada para un sistema hidropónico autónomo con condiciones variables.

A pesar de que los métodos de aprendizaje por refuerzo profundo son los más comunes, hay casos donde se utilizan métodos tabulares, como: el aprendizaje Q tabular, especialmente si el espacio de acción es lo suficientemente pequeño. Los métodos tabulares suelen requerir más espacio de memoria, ya que se deben mantener tablas para los pares estado-acción. Sin embargo;

su fácil implementación y procesos de toma de decisiones trazables siguen haciéndolos una alternativa atractiva a los métodos de aprendizaje profundo más complejos.

Aunque existen métodos que permiten interpretar las decisiones aprendidas, la explicabilidad de los algoritmos de aprendizaje por refuerzo para casos de uso agrícola es un tema que se ignora ampliamente. Sin embargo; las decisiones explicables son una parte crucial para ganar confianza en las políticas aprendidas, por ende, ayudan a disminuir la reticencia de los agricultores a utilizar sistemas de soporte de decisiones impulsados por aprendizaje automático.

En el presente proyecto, se realizará una investigación aplicada para evaluar el desempeño de distintos algoritmos de aprendizaje por refuerzo profundo, específicamente DQN, DDQN, PPO y SAC, con el objetivo de determinar cuál de ellos presenta la mejor capacidad de convergencia y estabilidad en el control automatizado del sistema hidropónico NFT. Cada algoritmo será entrenado y validado bajo las condiciones reales del sistema, considerando variables críticas como pH, conductividad eléctrica (CE) y temperatura, con el fin de identificar aquel que brinde el mejor equilibrio entre rendimiento, tiempo de convergencia y robustez ante perturbaciones.

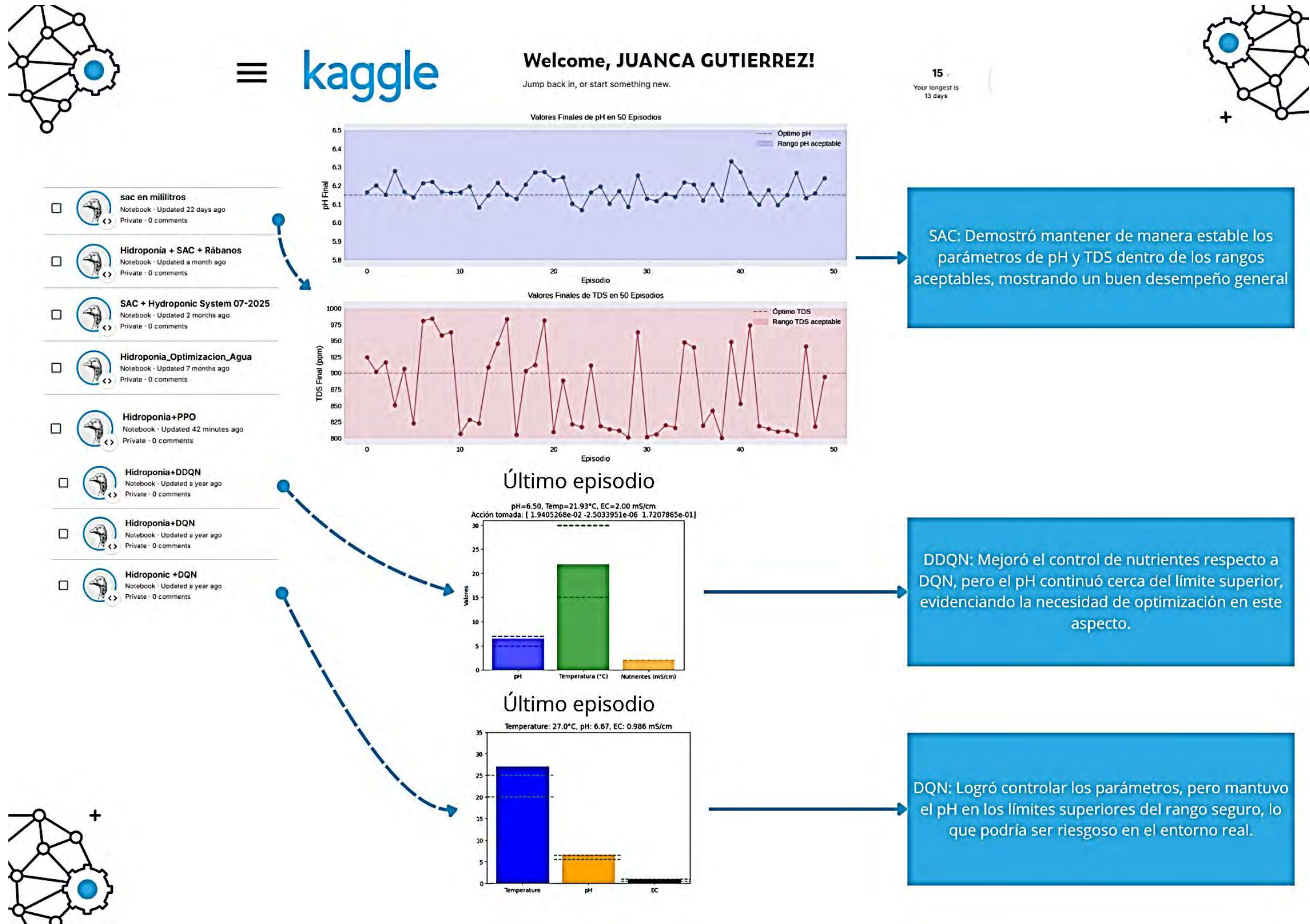
Ya se ha observado el potencial de los algoritmos de aprendizaje por refuerzo en entornos de agricultura inteligente y sistemas hidropónicos (Van den Bemd(2022); An et al.,(2021)). Estos trabajos han consolidado la relevancia de aplicar enfoques como SAC y PPO en escenarios de simulación agrícola, mostrando que estas técnicas permiten obtener estrategias de control más estables, adaptativas y sostenibles. Con base en estas referencias, se definió un conjunto de algoritmos que representa las principales familias de aprendizaje por refuerzo: aprendizaje basado en valores (DQN, DDQN), métodos de optimización de políticas (PPO) y enfoques actor-crítico con entropía suave (SAC). Esta selección metodológica aseguró una cobertura equilibrada de los

enfoques más empleados en la literatura, sin necesidad de ampliar hacia algoritmos menos utilizados o de impacto marginal en este tipo de aplicaciones.

Bajo este marco, se procedió a la experimentación en el sistema propuesto, evaluando la capacidad de cada algoritmo para generar políticas de control efectivas sobre el pH y la solución nutritiva. Los resultados, resumidos en la Ilustración 6, mostraron diferencias significativas en el desempeño de las alternativas, siendo SAC el algoritmo con mejor comportamiento. Este alcanzó una convergencia más consistente y estable, logrando políticas de control eficientes y robustas frente a la variabilidad del entorno, superando claramente a las demás estrategias consideradas. De este modo, se valida no solo la pertinencia de la selección realizada, sino también la eficacia de SAC como herramienta para la optimización del manejo de parámetros críticos en sistemas hidropónicos inteligentes.

Ilustración 6:

Comparación experimental de algoritmos de aprendizaje por refuerzo para la gestión inteligente de parámetros hidropónicos



Fuente: Elaboración propia

En la Tabla 5 se presenta un cuadro comparativo de los algoritmos de aprendizaje por refuerzo SAC, PPO, DQN y DDQN, considerando su tipo, base teórica, ventajas, desventajas y aplicaciones, con el fin de identificar el más adecuado para este estudio. La selección se basa en trabajos previos, como los de Van den Bemd (2024) y An et al. (2021), que evidenciaron su eficacia en la simulación y optimización de parámetros ambientales y de crecimiento en cultivos de lechuga y tomate cherry.

Tabla 5:

Cuadro comparativo entre SAC vs DQN vs PPO, algoritmos de aprendizaje por refuerzo

Algoritmo	Base teórica	Ventajas	Desventajas	Aplicaciones
<i>Soft Actor-Critic</i> (SAC)	Política (actor) + Valor (crítico)	Permite aprendizaje estable; se adapta a acciones continuas	Requiere ajuste fino de hiperparámetros; más complejo que métodos tabulares.	Robótica, juegos con acción continua
PPO	Optimización proximal	Evita grandes cambios de política; buen rendimiento en muchos entornos.	Algo más lento; requiere tuning; más costoso computacionalmente.	Simuladores complejos, IA en videojuegos
DQN	Q-learning + Red neuronal	Maneja entradas complejas técnicas como experiencia de repetición.	Solo funciona con acciones discretas; puede ser lento sin hardware potente.	Juegos tipo Atari, entornos visuales
DDQN-learning	Tabla Q + Ecuación de Bellman	Simple de implementar; altamente exploratorio.	Requiere tablas grandes para muchos estados; no ideal para espacios continuos.	Juegos simples, robótica básica

Fuente: (Muhammad, 2023)

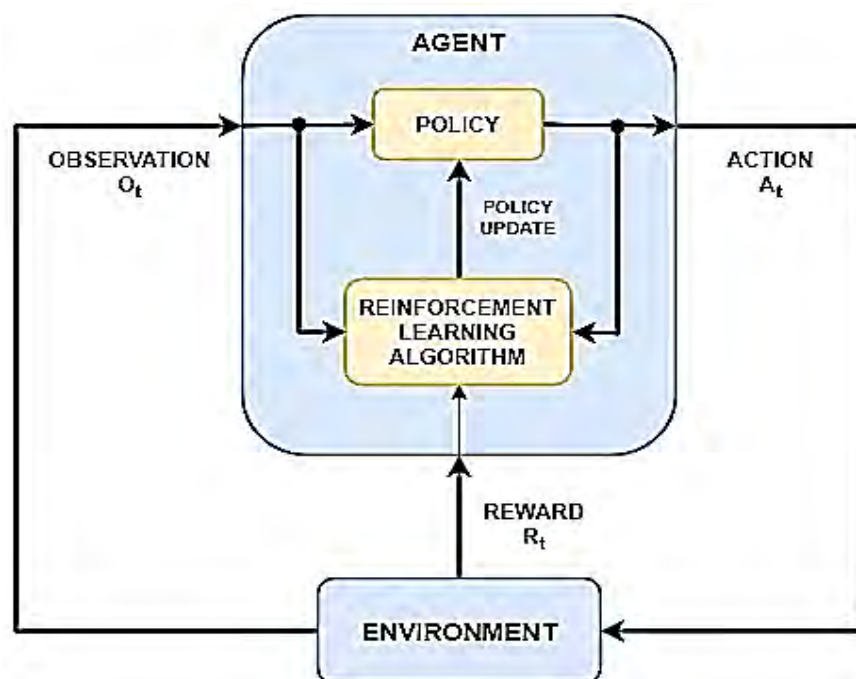
5.7. Algoritmo SAC como herramienta de automatización agrícola

5.7.1. *Soft Actor-Critic (SAC)*

El algoritmo *Soft Actor-Critic (SAC)* es una técnica dentro del campo del aprendizaje por refuerzo profundo (*Deep Reinforcement Learning, DRL*). Se caracteriza por su capacidad para operar en entornos continuos, donde se requiere que las decisiones del agente sean suaves, estables y eficientes. A diferencia de otros métodos; SAC no solo busca maximizar la recompensa esperada por cada acción, sino que también promueve una alta entropía en la política de decisiones, lo que permite un comportamiento exploratorio y evita caer en soluciones subóptimas o prematuras, el proceso general del funcionamiento de SAC se puede observar en la Ilustración 7.

Ilustración 7:

Representación general del proceso de aprendizaje por refuerzo de un solo paso.



Fuente: (Pajuhaan, 2025)

En el contexto agrícola, y específicamente en cultivos hidropónicos inteligentes, SAC se presenta como una herramienta prometedora para la regulación autónoma de parámetros críticos, como el pH y la conductividad eléctrica (EC). En este proyecto, SAC será implementado para tomar decisiones sobre la dosificación de soluciones nutritivas en función del estado actual del sistema, la predicción de condiciones futuras y variables ambientales. Por su parte, el control de la recirculación del agua no será gestionado por SAC, sino mediante un conjunto de reglas lógicas predefinidas basadas en la temperatura ambiente, variable identificada como clave para este proceso.

La política de control del algoritmo será entrenada previamente en un entorno simulado diseñado en OpenAI Gym, donde podrá interactuar con modelos virtuales del sistema hidropónico antes de su despliegue en el entorno físico real. Esta fase de simulación permite reducir riesgos, optimizar recursos y acelerar el aprendizaje del agente, garantizando una implementación más segura y eficiente en campo.

La integración de SAC con sensores, actuadores y conectividad remota forma parte de una arquitectura más amplia basada en Inteligencia Artificial de las Cosas (AIoT), que combina tecnologías de IoT con capacidades cognitivas, posibilitando sistemas agrícolas capaces de autogestión, adaptabilidad y toma de decisiones en tiempo real.

Estudios recientes han validado la aplicación de SAC en entornos agrícolas controlados. Por ejemplo, Goldenits et al. (2022) destacan que SAC ofrece ventajas frente a otros algoritmos en invernaderos, donde logra un balance óptimo entre estabilidad y exploración, favoreciendo el desarrollo sostenible. Asimismo, Van den Bemd (2022) demostraron que los agentes SAC y PPO superan en rentabilidad y eficiencia a los enfoques tradicionales, incluso bajo restricciones como

altos costos fijos. Además, An et al. (2021) encontraron que SAC logra converger a un beneficio neto estable, si bien su foco en recompensas a corto plazo puede requerir ajustes para contextos donde las decisiones deben considerar impactos de largo plazo.

En síntesis, el algoritmo *Soft Actor-Critic* representa una solución robusta y adaptable para el control automatizado de variables ambientales en sistemas hidropónicos. Su implementación en el presente proyecto no solo apunta a mejorar el rendimiento del cultivo, sino también a consolidar un modelo de agricultura inteligente, eficiente y resiliente, especialmente diseñado para zonas altoandinas.

5.7.2. Aplicaciones y ventajas del SAC en la agricultura de precisión

Diversos estudios han demostrado que el algoritmo *Soft Actor-Critic* (SAC) puede ser una herramienta altamente efectiva para la optimización del control en sistemas agrícolas automatizados. Por ejemplo, Van den Bemd (2022) evidencian que la incorporación de aleatorización física mejora significativamente el rendimiento de los algoritmos SAC y PPO en escenarios complejos. En su análisis, los modelos fueron entrenados en un único sistema hidropónico y posteriormente evaluados en distintos entornos, demostrando una capacidad de generalización superior respecto a las líneas base.

Por otro lado, An et al. (2021) aplicaron los algoritmos SAC, EGA (Algoritmo Genético Evolutivo) y un método heurístico en un simulador de plantación de tomate cherry, obteniendo estrategias de control que superaron el rendimiento humano y destacaron significativamente en competencias como la "Autonomous Greenhouse Challenge", tanto en precisión como en beneficios netos. Su estudio evidencia que los algoritmos de planificación basados en aprendizaje

por refuerzo pueden reproducir con alta fidelidad los procesos de cultivo en invernadero, lo cual valida su utilidad para contextos reales.

Estos trabajos demuestran que la combinación de técnicas de inteligencia artificial avanzadas, como SAC, y enfoques como la aleatorización física, pueden mejorar la adaptabilidad y eficiencia de los agentes de control. En el contexto de la agricultura de precisión, esto se traduce en una mayor capacidad para responder a condiciones cambiantes del entorno y en un aprovechamiento más eficaz de los recursos hídricos, nutricionales y energéticos.

5.8. Diseño de entornos simulados con OpenAI Gym para aprendizaje por refuerzo en sistemas hidropónicos

5.8.1. Introducción a Openai Gym y entornos hidropónicos

El entorno de simulación de OpenAI Gym es un marco desarrollado por OpenAI que permite la creación y personalización de escenarios para entrenar y evaluar modelos de aprendizaje por refuerzo; proporciona herramientas y componentes básicos que facilitan el desarrollo de simulaciones realistas en las que los agentes de IA pueden interactuar, tomar decisiones y recibir retroalimentación (Openai, 2025). Esto brinda a los modelos la oportunidad de adquirir conocimientos en un entorno controlado antes de su implementación en un sistema físico real.

Además, Su interfaz se caracteriza por el espacio de acción, una observación y una función de recompensa. En esta sección, elaboraremos estas propiedades. Se definirá un criterio de evaluación para medir el rendimiento de los agentes entrenados.

En el entorno, tanto el espacio de acción como el de observación consisten en valores continuos normalizados. La información contenida en el espacio de observación puede ser medida

o estimada en un sistema hidropónico real utilizando sensores estándar y una cámara para estimar el peso y la calidad de los cultivos.

5.8.2. *Uso de OpenAI Gym en la simulación de sistemas hidropónicos*

En un sistema hidropónico, OpenAI Gym se emplea para crear una versión virtual del sistema; de esta manera, el modelo de inteligencia artificial, específicamente *Soft Actor-Critic* (SAC), puede aprender a regular parámetros esenciales como el pH, la temperatura, la conductividad eléctrica (EC) y el nivel del agua sin arriesgar el sistema físico. Este método resulta particularmente útil en situaciones complejas; en estos casos, errores o ajustes incorrectos podrían dañar componentes o afectar el crecimiento de las plántulas.

5.8.3. *Elementos del entorno de simulación*

- **Estados:** En la simulación de un sistema hidropónico, el estado indica la condición actual de variables como el pH, la temperatura, el EC y el nivel del agua; estas deben mantenerse dentro de ciertos rangos para el mejor desarrollo de las plántulas. Estos valores se supervisan en cada paso de la simulación y se actualizan según las acciones que ejecuta el modelo.
- **Acciones:** Las acciones representan los ajustes que el modelo puede realizar en el sistema; en el entorno hidropónico, estas acciones son continuas y pueden incluir modificaciones en el pH (+0.1 o -0.1 unidades), la temperatura (+2°C o -2°C) y el EC (+0.2 mS/cm o -0.2 mS/cm). Estas acciones continuas son ideales para el modelo SAC, que se especializa en entornos que requieren un control fino y gradual de las variables.
- **Recompensas:** La función de recompensa en OpenAI Gym se configura para incentivar al modelo a mantener los parámetros dentro de los rangos óptimos; cada vez que el modelo ajusta una variable y la mantiene cerca de los valores ideales, recibe una recompensa positiva; por el contrario, si los valores se desvían de los rangos deseados, se aplica una penalización. Esta

estructura de recompensas orienta al modelo a tomar decisiones que maximicen la eficiencia de los recursos y optimicen el crecimiento de las plántulas.

- **Episodios de Entrenamiento:** Cada episodio representa un ciclo completo de condiciones en el sistema hidropónico; durante estos episodios, SAC aprende a interactuar con el entorno, explorando cómo diferentes ajustes en los parámetros afectan al sistema y adaptando su estrategia para maximizar las recompensas a lo largo del tiempo. Esto permite al modelo desarrollar una política de control favorable que posteriormente puede implementarse en el sistema físico.

5.9. Arquitectura conceptual del sistema hidropónico inteligente basado en aprendizaje por refuerzo profundo

5.9.1. Componentes funcionales del sistema propuesto

El sistema hidropónico inteligente propuesto se estructura como una plataforma autónoma de control embebido que integra múltiples componentes funcionales distribuidos en tres niveles: sensorial, de procesamiento y de actuación. Cada uno de estos niveles cumple una función específica dentro del ciclo de control, permitiendo una regulación automatizada y en tiempo real de los parámetros críticos del cultivo, sin necesidad de intervención humana.

En el nivel sensorial, se emplean sensores electrónicos para la medición del pH, la conductividad eléctrica (CE) y la temperatura ambiental. Estos sensores son responsables de monitorear continuamente el estado de la solución nutritiva y del entorno, proporcionando los datos necesarios para que el sistema tome decisiones informadas. La elección de sensores de bajo costo pero calibrables permite mantener la viabilidad económica del sistema en contextos rurales.

El procesamiento central del sistema se aloja en una Raspberry Pi 4 Modelo B, seleccionada por su capacidad de procesamiento suficiente para ejecutar modelos ligeros de aprendizaje profundo, así como por su compatibilidad con periféricos y bibliotecas de control en Python. En esta unidad se implementa el modelo de inteligencia artificial entrenado mediante el algoritmo *Soft Actor-Critic* (SAC), que se encarga de decidir cuándo y por cuánto tiempo deben activarse los actuadores, en función de los valores obtenidos por los sensores y del aprendizaje previo obtenido en simulación.

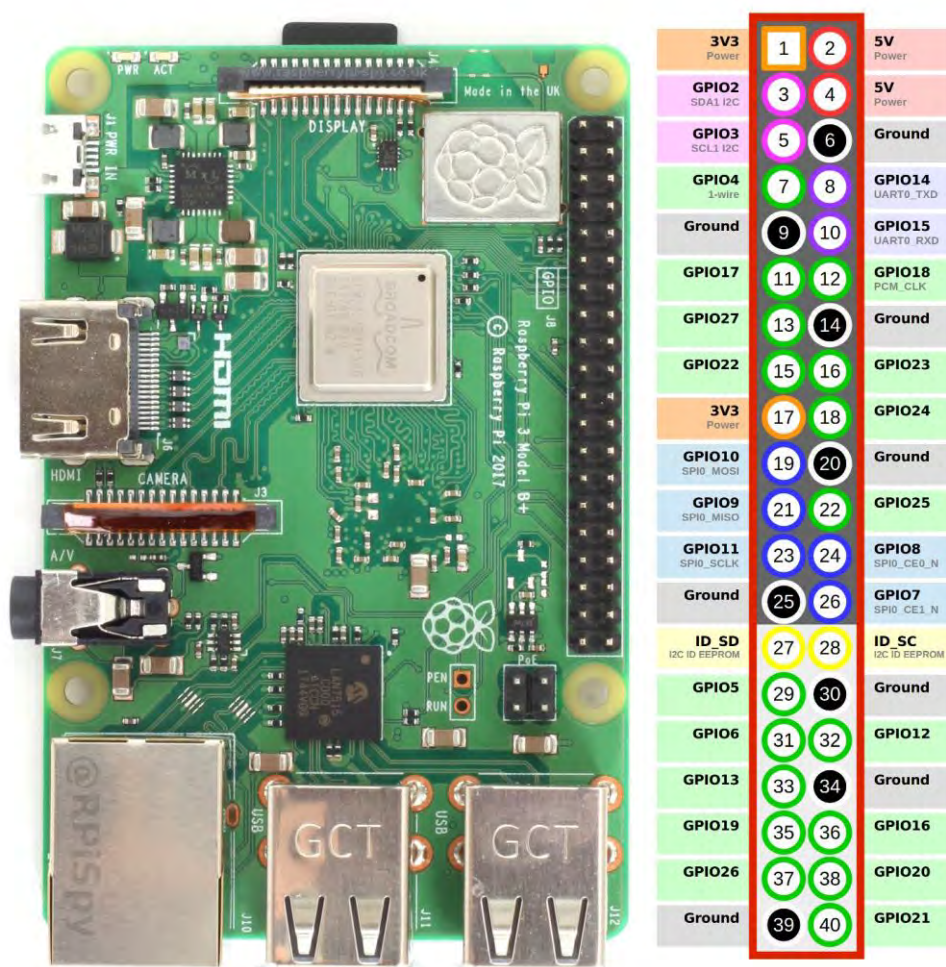
Finalmente, el nivel de actuación está compuesto por bombas peristálticas encargadas de dosificar soluciones reguladoras de pH y nutrientes, así como una bomba de recirculación, cuya activación se condiciona a la temperatura ambiental. Estas bombas están controladas mediante módulos de relé, que permiten la conexión y desconexión automática desde la Raspberry Pi. Este diseño permite mantener un flujo constante y controlado de solución nutritiva, ajustado dinámicamente según las necesidades del cultivo.

La integración de estos componentes en una arquitectura modular y autónoma permite que el sistema funcione de forma continua, incluso en condiciones de conectividad limitada, lo que lo convierte en una solución viable para comunidades rurales altoandinas como Mantoclla.

5.9.2. Rol de la raspberry pi como plataforma de control embebido

La Raspberry Pi 4 Modelo B mostrada en la Ilustración 8, desempeña un papel fundamental como unidad central de procesamiento del sistema propuesto. Esta minicomputadora de bajo costo y alta eficiencia energética ha sido seleccionada por su capacidad para ejecutar sistemas operativos ligeros basados en Linux. Así como por su compatibilidad con múltiples lenguajes de programación, interfaces de entrada/salida (GPIO), bibliotecas científicas y de control como: Python, NumPy, pandas, scikit-learn, PyTorch, TensorFlow y Adafruit.

Ilustración 8:
Raspberry pi 4 modelo B



Fuente: (Pi, 2019)

Su arquitectura permite el alojamiento del modelo de inteligencia artificial entrenado mediante el algoritmo *Soft Actor-Critic* (SAC), que regula dinámicamente los actuadores en función de los datos recibidos de los sensores. A diferencia de microcontroladores más limitados como Arduino o ESP32, la Raspberry Pi permite ejecutar modelos de aprendizaje profundo en tiempo real, sin necesidad de depender de servidores externos o plataformas en la nube, lo que garantiza la autonomía total del sistema, incluso en zonas sin conectividad a Internet.

Adicionalmente, la Raspberry Pi permite el control directo de los actuadores (bombas y relés) mediante sus pines GPIO, puede integrarse con periféricos como cámaras, pantallas o módulos de comunicación, en caso se requiera escalar el sistema en el futuro. Su capacidad de procesamiento, flexibilidad y soporte comunitario la convierten en una solución ideal para sistemas inteligentes embebidos de bajo costo, como el que se propone en este proyecto de investigación.

5.9.3. Integración sensorial y actuadores inteligentes

La efectividad del sistema propuesto depende en gran medida de la adecuada integración entre los sensores de entrada y los actuadores de salida, coordinados por el modelo inteligente. En el nivel sensorial, se utilizan sensores calibrables de pH y conductividad eléctrica (CE), los cuales permiten evaluar la calidad de la solución nutritiva en tiempo real. A ellos, se suma un sensor de temperatura ambiental, que determina cuándo debe activarse la bomba de recirculación para mantener las condiciones óptimas para el cultivo.

Los datos recogidos por estos sensores son enviados directamente a la Raspberry Pi, donde el modelo de inteligencia artificial, previamente entrenado, interpreta las lecturas y ejecuta acciones correctivas según la política aprendida. Las acciones incluyen el encendido de bombas

peristálticas encargadas de dosificar soluciones ácidas o nutritivas, y una bomba de recirculación controlada en función de la temperatura ambiente.

5.9.4. *Sensores*

Sensor de temperatura y humedad.

En la Ilustración 9 muestra un sensor digital DHT11 compacto que permite medir temperatura y humedad relativa del ambiente. Opera con un voltaje de alimentación entre 3,3 V y 5 V, y ofrece una salida digital que facilita su integración con microcontroladores como la Raspberry Pi. Su rango de medición de humedad va del 20 % al 95 %, con una precisión de ± 5 %, mientras que para temperatura mide entre 0 °C y 50 °C, con un margen de error de ± 2 °C. Su diseño incluye un orificio para montaje fijo y una placa PCB de 3,1 cm \times 1,4 cm, lo que lo hace fácil de instalar en prototipos electrónicos de bajo consumo y bajo costo.

Se utilizará este sensor DHT11 para medir temperatura y humedad del ambiente, proporcionando datos en tiempo real que serán integrados al sistema automatizado y permitirán optimizar las condiciones de cultivo de manera eficiente.

Ilustración 9:
*Sensor digital de temperatura y humedad
DHT11*



Fuente: (Umprob, 2025)

Sensor de pH.

La Ilustración 10 es un sensor de pH analógico utilizado en el proyecto este sensor está diseñado para aplicaciones en entornos líquidos con un rango de detección de temperatura de 0 °C a 80 °C. Posee un tiempo de respuesta ≤ 5 segundos y un tiempo de establecimiento ≤ 60 segundos, lo que permite lecturas rápidas y estables. La señal de salida es de tipo voltaje analógico, lo que facilita su integración con conversores ADC en plataformas como la Raspberry Pi. Opera con una potencia máxima de 0,5 W y soporta condiciones ambientales de hasta 95 % de humedad relativa, con una temperatura de trabajo entre -10 °C y 50 °C. Su módulo tiene dimensiones de 42 mm \times 32 mm \times 20 mm y presenta cuatro orificios de montaje M3 para una instalación fija y segura.

Se utilizará este sensor de pH para obtener mediciones precisas y rápidas del nivel de acidez o alcalinidad en la solución nutritiva, facilitando su integración con la Raspberry Pi mediante conversión analógica-digital y permitiendo un control automatizado y eficiente del sistema.

Ilustración 10:

Sensor regulador de detección de valor de pH líquido 0-14



Fuente: (Eqv, 2025)

Módulo ADS1011.

La Ilustración 11 muestra un módulo ADC de 16 bits con interfaz I2C admite hasta cuatro canales analógicos (AN0, AN1, AN2 y AN3) o dos entradas diferenciales, operando con un voltaje de alimentación de 2,0 a 5,5 V y un rango de entrada por canal de 0 a VDD. Ofrece modos de funcionamiento continuo con bajo consumo de 150 μ A y modo de disparo único con apagado automático, además de una velocidad de muestreo programable entre 8 y 860 muestras por segundo. Su control permite seleccionar entre siete rangos de entrada distintos, que van desde $\pm 0,256$ V hasta $\pm 6,144$ V, y cuenta con direcciones I2C configurables entre 0x48 y 0x4B (7 bits). Con unas dimensiones compactas de 18 mm x 28 mm, este módulo resulta ideal para aplicaciones de adquisición de datos de alta precisión.

Se utilizará este módulo ADS para convertir las señales analógicas de los sensores de pH y TDS en datos digitales, permitiendo su lectura precisa por la Raspberry Pi y asegurando una integración eficiente en el sistema automatizado."

Ilustración 11:
Módulo ADS1015 I2C de 16 bits



Fuente: (Tudio, 2025)

Sensor de EC&TDS.

La Ilustración 12 muestra un sensor de TDS (*Total Dissolved Solids*) empleado en este sistema, está compuesto por una sonda impermeable de dos electrodos y una placa adaptadora que convierte la señal en voltaje analógico. La sonda tiene una longitud total de 83 cm y se conecta mediante una interfaz XH2.54-2P, mientras que la placa de lectura utiliza una interfaz XH2.54-3P. El módulo opera con un voltaje de entrada de 3,3 a 5,5 V, una corriente de trabajo de 3 a 6 mA, y genera una salida analógica en el rango de 0 a 2,3 V, proporcional a la concentración de sólidos disueltos. Su rango de medición abarca de 0 a 1000 ppm, con una precisión de $\pm 10\%$ F.S. a 25 °C, y sus dimensiones físicas son de 42 × 32 mm. Este tipo de sensor es ampliamente utilizado en sistemas hidropónicos para estimar la conductividad eléctrica (EC) de la solución nutritiva, a partir de su relación con los sólidos disueltos presentes.

Se utilizará este sensor para medir en tiempo real la concentración de sólidos disueltos en la solución nutritiva. Esto permitirá estimar la conductividad eléctrica y evaluar la calidad del agua en el sistema. De esta forma, se asegurará un control preciso y automatizado de los nutrientes.

Ilustración 12:
Sensor de TDS/EC, medidor de solución nutritiva



Fuente: (Hzwdone, 2025)

Sensor de nivel de agua.

La Ilustración 13 muestra un sensor de nivel de líquido tipo flotador horizontal es un dispositivo mecánico-electrónico que permite detectar el nivel de líquidos dentro de tanques o reservorios. Este tipo de sensor se instala en posición lateral y puede ser utilizado para activar o desactivar dispositivos como bombas, alarmas o válvulas de control. Está fabricado en material plástico (PP), lo que le otorga resistencia a la humedad y compatibilidad con soluciones acuosas, incluyendo aplicaciones en hidroponía, acuarios, jardinería y tanques de agua dulce o salada. Además, casi siempre está acompañado con un relé de interruptor como el que se muestra en la Ilustración 14 para motor automático; Opera con un voltaje de entrada típico de 12 V o 24 V, y soporta una tensión de conmutación máxima de 110 VDC, con una corriente de conmutación de hasta 0,5 A. Su resistencia de contacto es ≤ 100 ohmios, y su rango de temperatura de operación es de -10°C a $+60^{\circ}\text{C}$. Este sensor no contiene mercurio y su diseño robusto lo hace ideal para proyectos de control automático de nivel en entornos rurales o de bajo mantenimiento.

Se empleará estos 2 sensores y el módulo relé de nivel para automatizar el control de reposición de agua del sistema, asegurando la disponibilidad de agua todo el tiempo.

Ilustración 13:

Sensor de nivel de agua líquida para tanque de 12-24V



Fuente: (Dazzleex, 2025)

Ilustración 14:

Módulo de relé de interruptor para Motor



Fuente: (Gaqqee, 2025)

5.9.5. Actuadores

Bomba de agua sumergible.

En la Ilustración 15 se puede observar la bomba sumergible de 7W utilizada en el proyecto. Este dispositivo de baja potencia diseñado para aplicaciones de circulación y recirculación de agua en sistemas cerrados como hidroponía, acuarios o tanques pequeños. Opera con una alimentación de 220–240 V a 50 Hz, y proporciona un caudal de hasta 400 litros por hora, con una altura máxima de elevación (Yang Cheng) de 1,0 metro. Su construcción incluye una carcasa de ABS reforzado, lo que garantiza durabilidad y resistencia a la humedad, así como un encapsulado de resina que mejora el aislamiento eléctrico y evita fugas de agua. El núcleo del eje está fabricado en acero inoxidable, ofreciendo buena resistencia mecánica y un desempeño estable. Además, incorpora una función de ajuste de flujo, lo que permite calibrar la circulación según las necesidades del sistema. Sus dimensiones son $65 \times 44 \times 54$ mm y su peso aproximado es de 0,3 kg, con un diámetro de salida de 8/13 mm.

Se empleará esta bomba sumergible para garantizar la circulación continua del agua en el sistema, asegurando un funcionamiento estable y eficiente.

Ilustración 15:
Mini bomba de agua sumergible de 12 V



Fuente: (Luck, 2025)

Bomba peristáltica

La Ilustración 16 muestra una bomba peristáltica micro DC, el cual es un dispositivo de dosificación compacta, adecuada para aplicaciones de bajo caudal como laboratorios, sistemas de riego automatizados y control de nutrientes en hidroponía. Está diseñada para operar con voltajes de 3 V, 6 V, 12 V o 24 V DC, y admite tubos de silicona o BPT, materiales seguros para el transporte de líquidos sin contaminación. Su rango de flujo va de 5,2 ml/min a 90 ml/min, permite funcionamiento en seco, autocebado y flujo reversible, lo que la hace versátil y confiable en sistemas automatizados. La bomba no requiere válvulas ni piezas de sellado interno, lo que facilita su mantenimiento y el reemplazo del tubo o del cabezal de bombeo. La estructura está fabricada con plásticos de ingeniería y contiene tres rodillos giratorios para un flujo estable. Sus dimensiones generales son de 67 mm de largo, con un motor de 48,5 mm, y soporta condiciones de operación entre 0 °C y 40 °C, con humedad relativa inferior al 80 %.

Se utilizará esta bomba peristáltica por su capacidad de dosificar nutrientes con precisión y bajo caudal, asegurando un control eficiente y confiable en el sistema automatizado.

Ilustración 16:

Bomba peristáltica CC 12V Micro bomba de líquido peristáltico silenciosa



Fuente: (Kamoer, 2025)

Modulo relé

La Ilustración 17 muestra un módulo relé electromecánico de 1 canal utilizado en este sistema. Este permite el control de cargas de alto voltaje desde microcontroladores de bajo voltaje, como la Raspberry Pi. Es compatible con tensiones de alimentación de 5 V o 12 V, y opera mediante una señal de disparo por nivel bajo (*low-level trigger*). El relé puede manejar una tensión de carga de hasta 250 V AC a 10 A o 30 V DC a 10 A, lo que lo hace apto para controlar bombas peristálticas, bomba sumergible de pequeña y mediana potencia.

En estado estático, consume 0 mA, y durante la operación alcanza una corriente máxima de 3,8 mA, lo que lo convierte en un módulo eficiente y seguro para uso continuo. Su vida útil está estimada en 10 millones de ciclos de conmutación, lo que asegura una alta durabilidad en sistemas embebidos automatizados. Este tipo de módulo es ampliamente utilizado en proyectos de automatización agrícola, domótica e IoT.

Se empleará este módulo relé por su capacidad de controlar de forma segura cargas de mayor voltaje desde la Raspberry Pi, garantizando eficiencia y durabilidad en el sistema automatizado.

Ilustración 17:
Módulo de relé de 5v - 12v



Fuente: (Tai&Sh, 2025)

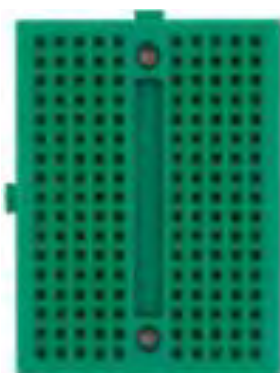
5.9.6. Otros componentes

Placa de pruebas (protoboard).

En la Ilustración 18 se presenta una placa de pruebas tipo breadboard SYB-170, un componente fundamental en la etapa de diseño y validación de circuitos electrónicos. Esta placa prototipo dispone de 170 puntos de conexión distribuidos en columnas laterales, lo que permite organizar de manera ordenada y segura los diferentes elementos del sistema sin recurrir a soldaduras permanentes. Su diseño compacto la hace adecuada para proyectos educativos, experimentales y de prototipado en sistemas embebidos.

La principal ventaja de este dispositivo radica en su versatilidad y reutilización, ya que facilita el armado y desarmado de circuitos eléctricos de forma rápida, permitiendo realizar pruebas con sensores, actuadores, cables Dupont, módulos relé y microcontroladores como la Raspberry Pi o el Arduino. De este modo, se convierte en una herramienta clave para integrar temporalmente los distintos componentes del sistema hidropónico, asegurando conexiones seguras y fácilmente modificables durante las fases de implementación y prueba.

Ilustración 18:
Placa de pruebas(Protoboard)



Fuente: (Group, 2025)

Cable dupont.

La Ilustración 19 muestra un conjunto de cables Dupont, un accesorio fundamental en el desarrollo de prototipos electrónicos con plataformas como Raspberry Pi, Arduino o ESP32. Este kit incluye 120 unidades por lote distribuidas en tres tipos de terminación: macho a macho, macho a hembra y hembra a hembra, lo que permite conectar de forma rápida y segura sensores, módulos y actuadores sin necesidad de soldadura.

Cada cable cuenta con conectores Dupont estándar de 2,54 mm y una longitud aproximada de 20 cm, lo que facilita la organización del prototipado sobre placas de pruebas tipo breadboard. Su compatibilidad con puertos GPIO y módulos externos permite realizar conexiones directas con placas Raspberry Pi 4B, 3B+, 5, entre otras. Están fabricados con aislamiento flexible de PVC y conductores internos de cobre estañado, ofreciendo buena conductividad y resistencia mecánica para usos repetidos en proyectos embebidos y de automatización.

Se utilizará cables Dupont por su versatilidad y facilidad de conexión en prototipos electrónicos, lo que permite integrar de forma rápida y segura los sensores, actuadores y la Raspberry Pi sin necesidad de soldaduras, facilitando el desarrollo y la validación del sistema automatizado.

Ilustración 19:
Cables Dupont



Fuente: (Nawei, 2025)

Sensores pre calibrados.

La Ilustración 20 muestra medidores digitales de pH y TDS/EC tipo lápiz utilizados como referencia en el proyecto. Estos sensores son instrumentos portátiles diseñados para la verificación rápida y precisa de la calidad del agua. Ambos dispositivos están precalibrados de fábrica, lo que permite su uso inmediato sin necesidad de procesos de calibración complejos. El medidor de pH opera en un rango de 0 a 14 unidades de pH, mientras que el medidor de TDS/EC ofrece un rango de lectura de 0 a 9990 ppm y su equivalente en conductividad eléctrica (EC), expresada en mS/cm.

Se empleará medidores digitales de pH y TDS/EC tipo lápiz como instrumentos de referencia para verificar la precisión de los sensores del sistema automatizado, dado que ofrecen mediciones rápidas, confiables y no requieren calibraciones complejas, garantizando así la validez de los datos obtenidos en campo.

Ilustración 20:
Medidores de PH y TDS/EC



Fuente: (Juanjuan, 2025)

5.9.7. Lógica de control autónomo mediante SAC

La lógica de control del sistema se basa en un modelo de aprendizaje por refuerzo profundo, específicamente el algoritmo *Soft Actor-Critic* (SAC), seleccionado por su capacidad de operar en entornos continuos, estocásticos y con múltiples variables de decisión. A diferencia de los sistemas tradicionales de control por reglas fijas, el aprendizaje por refuerzo permite que el agente aprenda una política óptima de acción a través de la interacción directa con un entorno simulado.

En este caso, el modelo entrenado con SAC toma decisiones sobre la activación de bombas para regular el pH, la conductividad eléctrica y la recirculación del agua en función de la temperatura ambiente, basándose en las recompensas acumuladas por mantener los parámetros dentro de rangos deseables. La política aprendida se traduce en acciones como: dosificar ácido cuando el pH supera el umbral, o activar la recirculación si la temperatura es elevada.

Una vez entrenado, el modelo se implementa en la Raspberry Pi, donde funciona de manera autónoma, interpretando datos en tiempo real y ejecutando acciones sin supervisión externa. Esta capacidad de adaptación dinámica permite que, el sistema responda a variaciones del entorno sin necesidad de ajustes manuales constantes.

5.9.8. Autonomía energética y consideraciones de bajo consumo

Dado que el sistema está destinado a operar en contextos rurales con acceso limitado o intermitente a la red eléctrica, se ha considerado fundamental el uso de una fuente de energía alternativa. Por ello, el sistema se alimenta a través de un panel solar, conectado a una batería recargable como se puede observar en la Ilustración 21, lo que permite su funcionamiento autónomo incluso durante cortes prolongados de energía.

Ilustración 21:

Panel solar + controlador de carga+bateria+ inversor de energia con salida de 220 v a 12 v



Fuente: (Cfdzcp, 2025)

La elección de componentes de bajo consumo, como la Raspberry Pi ($\sim 3A$), sensores digitales y bombas ($\sim 0.5A$) con control intermitente, ha sido clave para garantizar la operatividad del sistema con una capacidad energética limitada. Además, se incorpora un temporizador programado como se puede observar en la Ilustración 22 que regula los intervalos de funcionamiento, optimizando el uso de energía sin comprometer el monitoreo ni el control de los parámetros del sistema.

Ilustración 22:

Temporizaro digital programable



Fuente: (C&M, 2025)

En casos excepcionales donde la radiación solar sea insuficiente durante varios días consecutivos, el sistema cuenta con una conexión de respaldo a la red eléctrica domiciliaria, activada automáticamente cuando el voltaje de la batería cae por debajo de un umbral crítico. Este enfoque híbrido asegura la continuidad del servicio sin intervención manual.

5.9.9. *Ventajas del diseño autónomo sin interfaz gráfica*

A diferencia de otros sistemas que requieren monitoreo constante a través de plataformas web o aplicaciones móviles, el sistema propuesto ha sido diseñado para funcionar de manera completamente autónoma, sin interfaz gráfica de usuario (GUI). Esta decisión responde al objetivo de reducir la complejidad, el consumo energético y los requerimientos de conectividad, permitiendo que el sistema opere sin supervisión en tiempo real.

El control, monitoreo y toma de decisiones están totalmente descentralizados y alojados localmente en la Raspberry Pi. Las configuraciones iniciales y revisiones técnicas se realizan mediante conexiones remotas ocasionales vía SSH (*Secure Shell*), lo que permite verificar el estado del sistema y acceder a una cámara opcional instalada para observación visual, sin necesidad de una interfaz activa permanente.

Este enfoque minimalista mejora la robustez del sistema, disminuye los puntos de fallo y lo hace ideal para entornos rurales con infraestructura limitada, donde la prioridad es la estabilidad, la eficiencia y la baja demanda de mantenimiento.

5.10. Fundamentos tecnológicos y herramientas de desarrollo para la implementación del sistema hidropónico inteligente

5.10.1. Lenguaje de programación y entorno de desarrollo

El sistema de control inteligente propuesto está desarrollado en Python, un lenguaje de programación interpretado, de código abierto y ampliamente utilizado en proyectos de inteligencia artificial, automatización y computación embebida (Python.org, 2025). Dada su sintaxis accesible, su compatibilidad con una extensa variedad de bibliotecas científicas, y su integración eficiente con hardware de bajo nivel, Python se adapta perfectamente a sistemas embebidos como la Raspberry Pi 4 Modelo B.

Se emplea una versión estable de Python 3, preinstalada en Raspberry Pi OS (Linux basado en Debian). Dado que el dispositivo funciona como unidad autónoma sin interfaz gráfica activa, el control y la programación del sistema se realizan de manera remota. Para ello, se utilizan herramientas como:

- MobaXterm: permite el acceso vía SSH con entorno de terminal y transferencia de archivos SFTP integrada.
- RealVNC Viewer: habilito acceso remoto con escritorio gráfico cuando es necesario realizar configuraciones visuales puntuales.
- Advanced IP Scanner: se utiliza para detectar la dirección IP local de la Raspberry Pi en la red y facilitar su conexión remota.

Este conjunto de herramientas facilita el desarrollo, monitoreo y actualización del sistema de forma remota, minimizando la necesidad de conexión directa con periféricos físicos. El entorno

de programación y prueba se mantiene ligero para asegurar que la mayor parte de los recursos computacionales se dediquen a la ejecución del modelo de inteligencia artificial y al control de los sensores y actuadores.

5.10.2. Librerías para hardware y sensores

Para el manejo de los sensores físicos y los actuadores conectados a la Raspberry Pi, se emplean diversas librerías específicas de control de hardware. Entre ellas, se destacan:

- `board` y `busio`: permiten la configuración de buses I2C y SPI para la comunicación entre la Raspberry Pi y módulos externos.
- `adafruit_ads1x15.ads1015` y `AnalogIn`: se utilizan para la lectura de señales analógicas (como pH o CE) mediante el conversor analógico-digital ADS1015.
- `adafruit_dht`: permite leer temperatura y humedad desde sensores digitales DHT.
- `RPi.GPIO`: ofrece una interfaz simple para controlar los pines GPIO de la Raspberry Pi, útil para activar relés y bombas peristálticas.

Estas librerías proporcionan un puente eficiente entre el sistema operativo de la Raspberry y el entorno físico, permitiendo que el modelo de control accione los actuadores con base en las lecturas en tiempo real.

5.10.3. Librerías de Inteligencia Artificial y Aprendizaje por Refuerzo

El entrenamiento y despliegue del modelo de control se realiza con el uso de la librería *stable-baselines3*, que proporciona implementaciones estables de algoritmos de aprendizaje por refuerzo profundo (Stable-baselines3, 2025). En este proyecto se utiliza el algoritmo *Soft Actor-Critic* (SAC), adecuado para entornos continuos con alta variabilidad, como el control de parámetros fisicoquímicos en soluciones hidropónicas.

Complementariamente, se emplean NumPy para operaciones matriciales y procesamiento de datos numéricos, y otras dependencias auxiliares como gym, necesarias para construir entornos compatibles con OpenAI Gym. Aunque se entrena el modelo en un entorno simulado, este se exporta como una política aprendida que es cargada y ejecutada directamente en la Raspberry Pi.

5.10.4. Entorno simulado personalizado

Para entrenar el agente inteligente de manera segura y eficiente antes de implementarlo en el entorno físico, se ha desarrollado un entorno simulado propio compatible con la interfaz de OpenAI Gym (Openai, 2025), denominado *HydroponicEnv*. Este entorno replica las dinámicas básicas del sistema hidropónico, permitiendo al modelo interactuar, aprender y adaptarse a distintas situaciones simuladas mediante pruebas múltiples sin poner en riesgo el cultivo real.

El entorno simulado incluye definiciones de espacio de observación, espacio de acción, función de recompensa y reglas de transición, siguiendo las especificaciones de OpenAI Gym. Esto permite que el algoritmo SAC aprenda una política óptima que luego será aplicada en el sistema real, alojado en la Raspberry Pi. Esta separación entre fase de entrenamiento y ejecución garantiza un control más estable y seguro en el entorno físico.

5.11. Metodología de desarrollo del sistema AIoT

5.11.1. Diseño metodológico con enfoque *Hardware–Software Co-Design* y *Scrum*

Para el desarrollo del sistema inteligente de automatización NFT en el cultivo de rábanos, se optó por aplicar la metodología *Hardware–Software Co-Design* en combinación con el marco ágil *Scrum* adaptado a un único desarrollador. Esta combinación permitió iterar de forma ordenada sobre la integración de sensores, lógica de control, entrenamiento de algoritmos de IA y validación en campo.

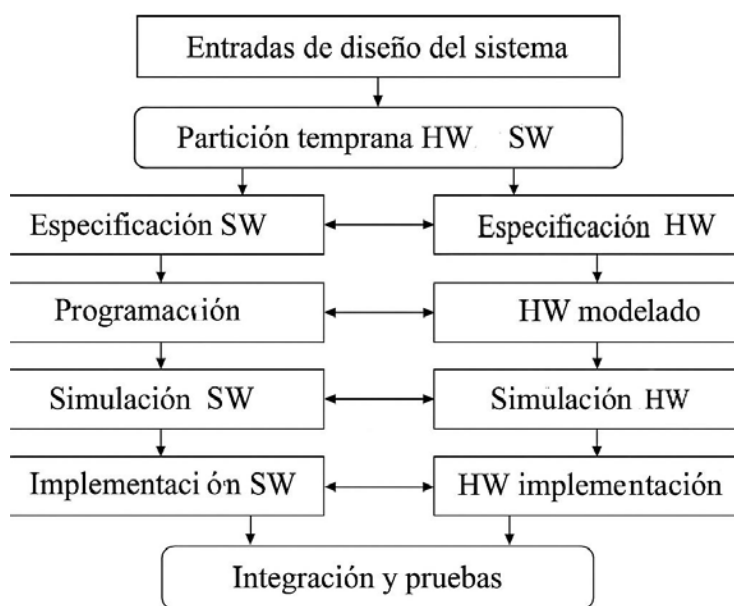
La elección de esta metodología responde a la necesidad de coordinar simultáneamente el desarrollo de hardware (sensores, bombas, relés, energía solar) y software (entorno simulado, modelo SAC, controladores de dispositivos). El proceso fue dividido en sprints, de forma tal que cada fase produjera un resultado verificable, permitiendo avanzar con iteraciones sucesivas.

5.11.2. *Hardware–Software Co-Design: Concepto y principios*

El enfoque de *Hardware–Software Co-Design* (diseño conjunto de hardware y software) Ilustración 23, surge como una metodología moderna para el desarrollo de sistemas embebidos que integran componentes físicos, electrónicos, digitales e inteligentes. Esta metodología propone un desarrollo paralelo y coordinado entre las funciones físicas (sensores, actuadores, placas de control) y los algoritmos lógicos (procesamiento, toma de decisiones, IA), permitiendo optimizar el rendimiento global del sistema, reducir errores de integración y mejorar la eficiencia del diseño (James K. Peckol, 2019).

A diferencia de metodologías secuenciales tradicionales, el co-design permite tomar decisiones arquitectónicas desde una visión completa del sistema, donde el hardware y el software evolucionan de manera sinérgica en base a las restricciones y funcionalidades del entorno.

Ilustración 23:
Flujo hardware/software co-design



Fuente: (Wang, 2010)

5.11.3. Aplicación del Co-Design en sistemas físicos-inteligentes

Este enfoque ha demostrado ser altamente efectivo en proyectos donde se requiere una interacción compleja entre el entorno físico y los procesos de decisión automatizados. En aplicaciones agrícolas, industriales o domésticas, el diseño conjunto facilita la creación de sistemas robustos que integran sensores, controladores, modelos predictivos y automatización en una misma plataforma, como por ejemplo en sistemas de riego inteligente, vehículos autónomos o entornos domóticos.

En entornos rurales, el Co-Design permite adaptar el sistema a condiciones reales desde la etapa de diseño, considerando variables como el acceso a energía, la simplicidad de mantenimiento y la adaptabilidad del software a situaciones cambiantes.

5.11.4. Complementariedad con metodologías ágiles y simulación

Aunque el Co-Design proporciona una base estructural sólida, su implementación se ve fortalecida mediante la incorporación de enfoques ágiles (Scrum, desarrollo iterativo) y herramientas de simulación (como OpenAI Gym), que permiten validar hipótesis y entrenar algoritmos inteligentes antes de desplegarlos en el entorno físico.

Scrum, como marco ágil de trabajo, será utilizado en las fases de desarrollo e integración del sistema (Asana, 2025). Cada sprint (ciclo de desarrollo de 2 a 3 semanas) se enfocará en una funcionalidad específica del sistema: lectura de sensores, calibración, activación de bombas, conexión de la IA, validación, etc. Se realizarán reuniones breves para planificar, revisar avances y ajustar el backlog de tareas.

5.11.5. Justificación de su uso en la presente investigación

El sistema AIoT propuesto para el vivero hidropónico NFT en Mantoclla requiere integrar componentes físicos (bombas, sensores, estructuras NFT), digitales (Raspberry Pi, buses de comunicación, interfaces) e inteligentes (modelo SAC de inteligencia artificial). Esta combinación de elementos, en un entorno rural con limitaciones energéticas y de conectividad, hace necesario un enfoque de desarrollo riguroso y adaptable.

El Co-Design garantiza que la arquitectura del sistema sea coherente, eficiente y verificable desde el diseño hasta la operación. La posibilidad de simular y entrenar el sistema en entornos virtuales, antes de su implementación física, incrementa su confiabilidad y permite validar su funcionalidad sin riesgos. La aplicación de Scrum permite organizar el desarrollo en ciclos iterativos controlados y adaptables. Por estas razones, se adopta como fundamento metodológico central de esta investigación.

5.11.6. Fases del desarrollo del sistema

Para la ejecución del presente proyecto de investigación se aplicó la metodología combinada Hardware–Software Co-Design + Scrum, la cual permitió desarrollar el sistema de manera iterativa, colaborativa y paralela, integrando tanto el diseño físico (hardware) como la programación del software (modelo SAC). En base a esta metodología, el desarrollo del sistema se estructuró en seis fases principales, las cuales se detallan en la siguiente tabla 6:

Tabla 6:
Fases del desarrollo del sistema AIoT

Fase	Descripción	Resultado obtenido
1. Análisis del problema	Identificación de la problemática de escasez de agua en Mantoclla, revisión de antecedentes sobre hidroponía, IoT y modelos de IA.	Definición de objetivos, justificación y alcance del sistema.
2. Diseño del sistema AIoT	Elaboración de la arquitectura general bajo el enfoque Hardware–Software Co-Design, selección de sensores, actuadores y componentes electrónicos.	Diagramas de hardware y software del sistema.
3. Implementación y programación	Construcción del prototipo físico del vivero hidropónico y desarrollo del núcleo de procesamiento inteligente SAC en Python sobre Raspberry Pi.	Sistema funcional y operativo que integra hardware y software.
4. Validación y pruebas	Ejecución de pruebas de funcionamiento, calibración de sensores y evaluación del modelo mediante métricas MAE (pH) y RMSE (TDS).	Validación experimental del sistema en condiciones reales.
5. Análisis de resultados	Evaluación del desempeño del sistema, análisis de ahorro de agua, eficiencia energética y estabilidad de parámetros.	Datos cuantitativos del rendimiento del sistema.

Fuente: Elaboración propia

5.11.7. Trello como herramienta de gestión ágil de proyectos

Trello es una plataforma en línea para la gestión visual de tareas, basada en el método Kanban. En este proyecto, se utilizó como soporte práctico para implementar la metodología ágil Scrum, permitiendo organizar los sprints, distribuir tareas, asignar responsables, establecer fechas y registrar avances. Asimismo, se aplicará como herramienta de sincronización dentro del enfoque Hardware–Software Co-Design, permitiendo visualizar en paralelo el progreso del desarrollo de hardware y software, mediante el uso de etiquetas diferenciadas y listas por sprint. La estructura del tablero se complementó con Power-Ups como Calendar, que permitieron representar el cronograma en formato calendario o diagrama de Gantt (Trello, 2025).

5.11.8. Herramienta de gestión ágil y planificación visual: uso de ClickUp

ClickUp es una herramienta digital de gestión de proyectos que permite organizar, planificar y dar seguimiento a actividades en entornos de desarrollo ágil. Esta plataforma soporta múltiples vistas, como tableros Kanban, calendarios, listas, cronogramas tipo Gantt y líneas de tiempo, lo que la convierte en una solución integral para proyectos que integran tanto software como hardware, como es el caso del presente trabajo (Clickup, 2025). Dentro de este proyecto AIoT basado en el enfoque Hardware–Software Co-Design, ClickUp se utilizará para representar y organizar las tareas de cada sprint definido bajo la metodología Scrum adaptada para un solo desarrollador. Las tareas se clasificaron según su naturaleza (Hardware, Software o mixta), se les asignaron fechas y estados (pendiente, en progreso, completado) y se distribuyeron en paralelo cuando la lógica de Co-Design lo permitió.

5.12. Métodos de evaluación de la eficiencia hídrica en sistemas hidropónicos

La eficiencia en el uso del agua es un indicador crítico en sistemas agrícolas, especialmente en contextos rurales con escasez hídrica como la comunidad de Mantoclla. Para este proyecto, la

evaluación de la eficiencia hídrica se realizará mediante la cuantificación del volumen total de agua utilizada durante un ciclo completo de cultivo de rábanos (30 días), y su relación con el número de plantas atendidas.

La evaluación de la eficiencia en el uso del agua se realizará empleando fórmulas matemáticas estandarizadas que permitirán cuantificar y comparar el consumo hídrico entre el sistema convencional en suelo y el sistema hidropónico con AIoT.

La fórmula general para calcular la intensidad de consumo por planta estará dada por la siguiente ecuación, que determina la intensidad relativa del consumo y mide la relación existente entre el consumo medio del volumen de agua de una planta (Mkd, 2025):

$$\text{Consumo por planta(L/planta)} = \frac{\text{Volumen total de agua utilizada(L)}}{\text{Número de Plantas}}$$

Asimismo, para estimar el porcentaje de ahorro de agua alcanzado con la implementación del sistema hidropónico basado en AIoT, se empleará el principio de reducción porcentual. Dicho enfoque ha sido previamente utilizado en diversos campos de la investigación, como en el estudio de Verdoliva et al. (2021), quienes aplicaron esta fórmula para cuantificar la reducción relativa en absorbancia de tomates cultivados en sistemas hidropónicos frente a sistemas de suelo. Adaptando este principio, en el presente trabajo se propone la siguiente ecuación:

$$\text{Ahorro de agua(\%)} = \left(\frac{\text{Consumo}_{\text{Tradicional}} - \text{Consumo}_{\text{Con AIoT}}}{\text{Consumo}_{\text{Tradicional}}} \right) \times 100\%$$

Ambas expresiones responden a la misma lógica matemática: determinar qué porcentaje de la cantidad inicial (absorbancia o agua) ha sido reducido respecto a una condición de control. Este procedimiento permite obtener un indicador objetivo e independiente del tamaño del sistema,

ampliamente utilizado en estudios de eficiencia agrícola, energética e hídrica (Verdoliva S. G., 2021), ya que permite cuantificar, en términos porcentuales, la reducción del consumo de agua lograda mediante la implementación de tecnologías innovadoras frente a métodos tradicionales (Cuemath, 2025) (Científic, 2023).

6. Diseño metodológico

6.1. Tipo de investigación

La presente investigación es de tipo aplicada y experimental, ya que busca resolver una problemática concreta del sector agrícola mediante el diseño, implementación y validación de un sistema hidropónico basado en IAoT (Inteligencia Artificial de las Cosas). Se emplea un enfoque experimental al manipular variables del entorno de cultivo (como el pH, CE) y la bomba de recirculación en función de la temperatura ambiente, para observar el impacto del sistema automatizado sobre el desarrollo del rábano.

6.2. Método de la investigación

Se aplicará un método experimental en un entorno controlado, con la implementación de un sistema hidropónico NFT (*Nutrient Film Technique*) automatizado mediante sensores y actuadores gobernados por una Raspberry Pi. Se integrarán modelos de inteligencia artificial para la toma de decisiones autónomas sobre el control del pH y la conductividad eléctrica (CE), en función de las condiciones reales del entorno. Su desempeño será evaluado a través del análisis de variables técnicas (EC, pH, consumo hídrico en función a la temperatura ambiente) y fisiológicas del cultivo (como longitud y peso del rábano), comparando los resultados entre el grupo experimental y el grupo control.

6.3. Diseño de la investigación

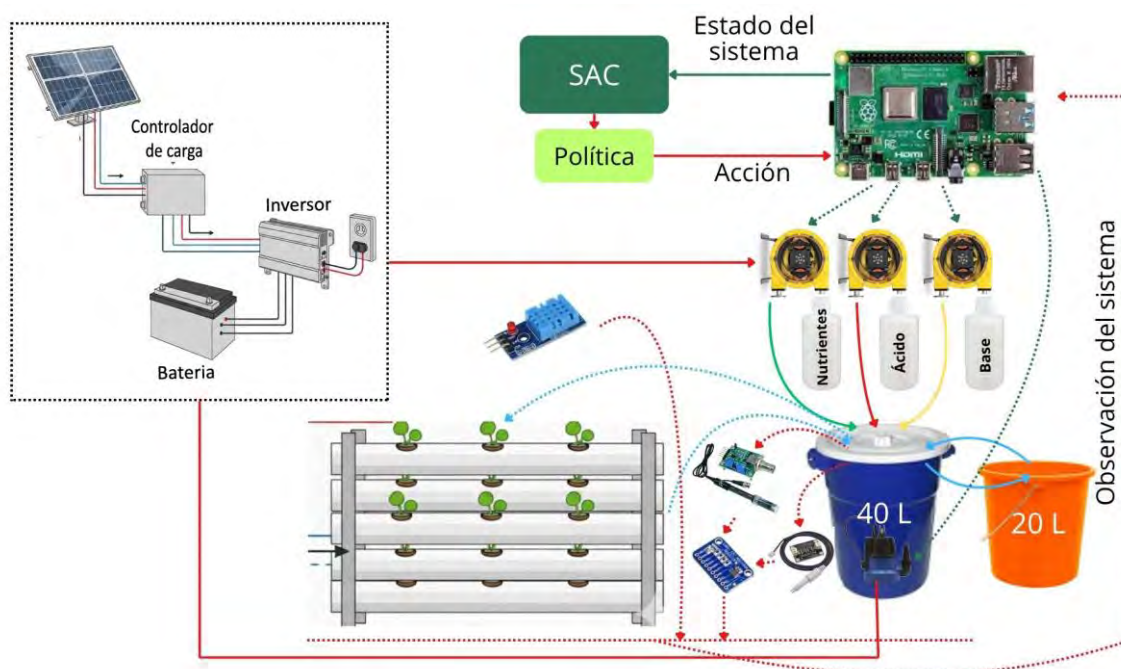
Se utilizará un diseño cuasiexperimental con grupo control y grupo experimental, el cual permite comparar los efectos de la intervención del sistema AIoT sobre el desarrollo del cultivo de rábano. En este diseño, se trabajará con dos camas de cultivo hidropónico NFT: una correspondiente al grupo experimental, donde se implementará el sistema automatizado con

inteligencia artificial para el control del pH, CE y recirculación del agua; y otra correspondiente al grupo control, que funcionará bajo condiciones estándar sin automatización.

Ambos grupos estarán sometidos a condiciones similares de entorno (tipo de fitotoldo, tipo de cultivo, solución nutritiva base, ubicación, entre otros), lo que permitirá aislar y analizar el efecto específico de la automatización basada en IAoT el cual se podrá apreciar de forma visual en el diagrama de funcionamiento general en la Ilustración 24. Se aplicará un pretest al inicio del experimento para establecer el estado inicial de las variables fisiológicas (como peso, longitud, vigor de las plantas) y técnicas (como CE, pH, consumo de agua, temperatura), y un posttest al finalizar el ciclo de cultivo, con el fin de comparar los cambios producidos por la intervención tecnológica en la eficiencia hídrica de modo que podamos observar el porcentaje de agua ahorrada en de cada sistema.

Ilustración 24:

Diagrama de funcionamiento sistema hidropónico inteligente



Fuente: Elaboración propia

6.4. Enfoque de la investigación

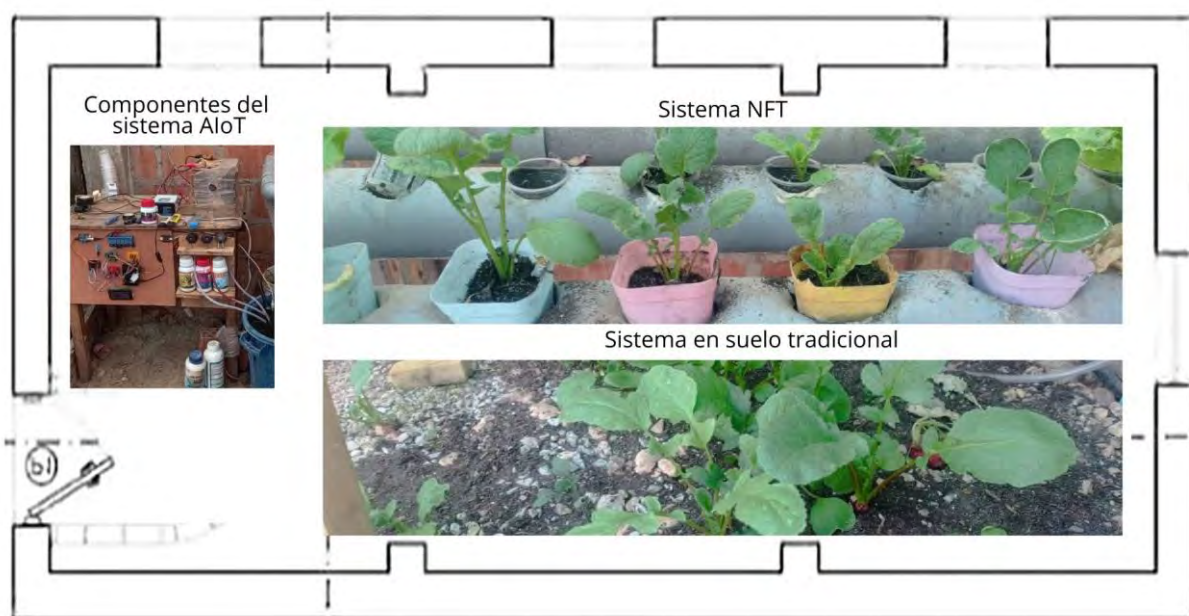
El enfoque es cuantitativo, dado que se recopilan y analizan datos numéricos medibles sobre los parámetros críticos de cultivo. Esto permite establecer correlaciones objetivas entre el comportamiento del sistema AIoT y el rendimiento del cultivo, así como validar empíricamente su efectividad.

6.5. Población y muestra

La población está conformada por sistemas de cultivo hidropónico de rábanos en entornos protegidos dentro de la comunidad de Mantoclla, distrito de Anta. La unidad de análisis se centra en módulos hidropónicos tipo NFT (*Nutrient Film Technique*) instalados en un fitotoldo tipo capilla. La muestra está compuesta por dos camas, los cuales estarán separados como se muestra en la Ilustración 25, una hidropónica y la otra en suelo, cada una con 30 plantas de rábano, lo que hace un total de 60 unidades experimentales. Una de las camas corresponde al grupo experimental,

Ilustración 25:

Disposición del sistema hidropónico basado en AIoT

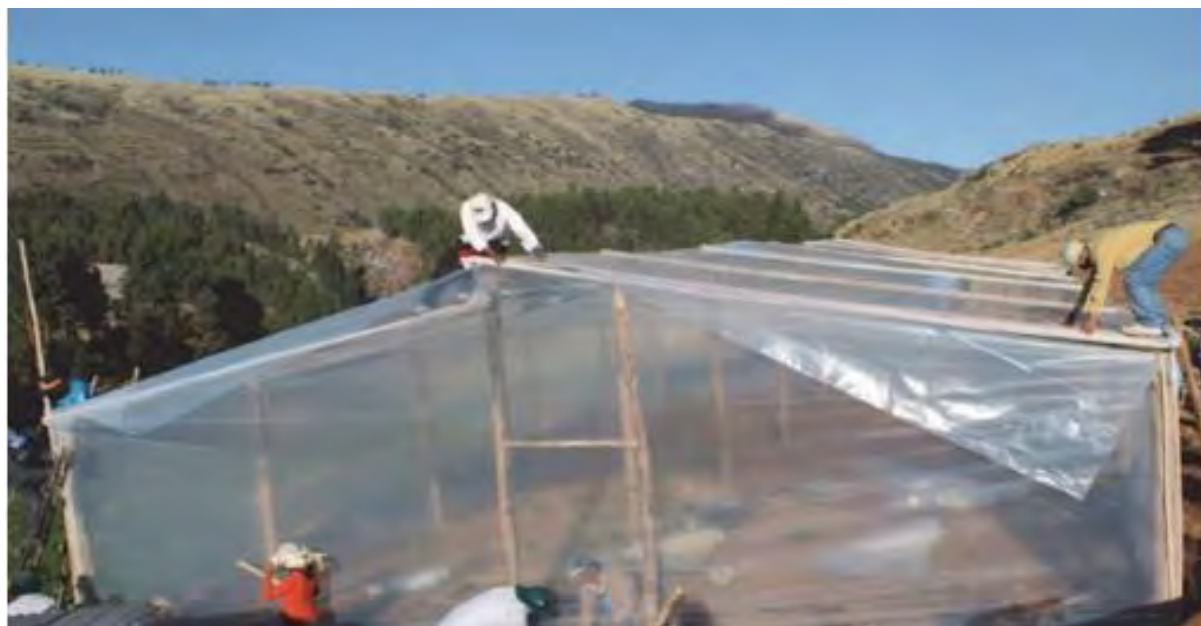


Fuente: Elaboración propia

donde se aplicará el sistema AIoT para el control automatizado del pH y la conductividad eléctrica (CE), además de la gestión estratégica de la recirculación del agua en función de la temperatura ambiente. La otra cama constituye el grupo control, donde se mantendrán condiciones convencionales sin automatización.

La selección de la muestra se realizó mediante un muestreo no probabilístico intencional, motivado por razones logísticas y técnicas, tales como la capacidad del fitotoldo estándar que se puede observar en la Ilustración 26, la disponibilidad de infraestructura y recursos, así como la necesidad de validar el funcionamiento del sistema en un entorno controlado. Las 30 plantas por cama se consideraron adecuadas para evaluar el desempeño del sistema inteligente, permitiendo realizar análisis comparativos y detectar efectos significativos en el desarrollo del cultivo, dentro de los márgenes operativos del proyecto, Además de la muestra tiene un ciclo corto de productividad y es más sensible a cambios de los parámetros.

Ilustración 26:
Fitotoldo tipo Capilla



Fuente: (Qorichacra, 2016)

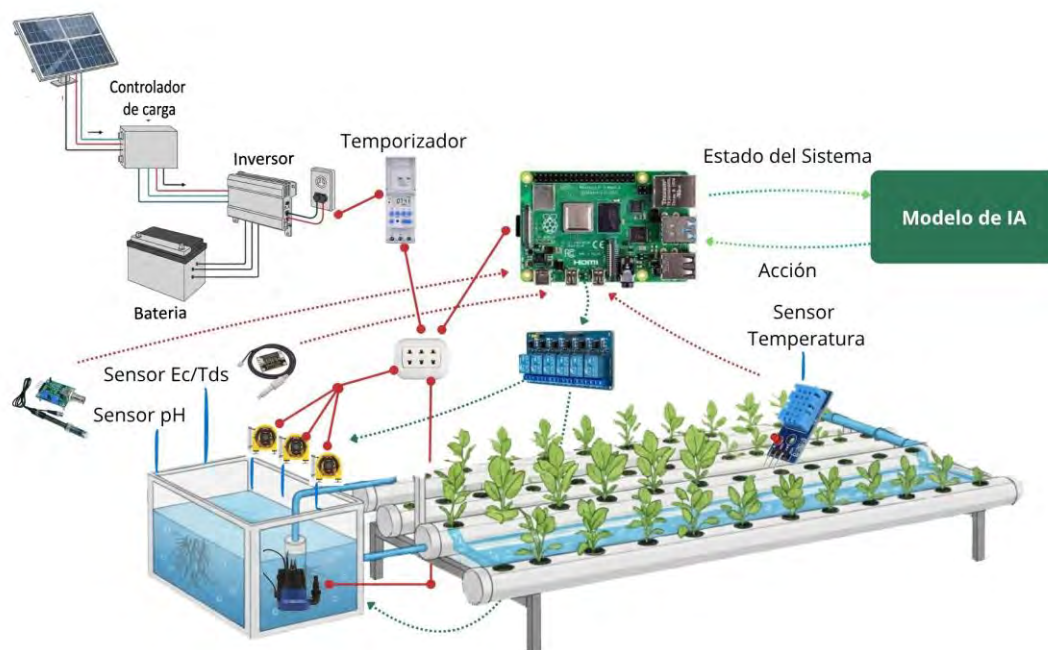
6.6. Técnicas e instrumentos de recolección de datos.

Para la recolección de datos se aplicará la técnica de observación sistemática y registro automatizado. Se considera observación sistemática porque las variables (pH, conductividad eléctrica y temperatura ambiente) serán registradas de manera continua y organizada en intervalos regulares de tiempo, siguiendo un protocolo previamente establecido en el entorno controlado del fitotoldo.

Como instrumentos, se emplearán sensores de pH, conductividad eléctrica (CE) y temperatura ambiente, integrados a una Raspberry Pi configurada para el almacenamiento y procesamiento de datos en tiempo real como se puede observar en la Ilustración 27. Este conjunto permitirá evaluar el comportamiento del sistema en distintas condiciones ambientales y analizar el impacto de la automatización sobre el desarrollo del cultivo de rábano.

Ilustración 27:

Esquema visual del montaje experimental.



Fuente: Elaboración propia

6.7. Unidad experimental.

Se empleará una estructura basada en el sistema NFT (*Nutrient Film Technique*), implementada dentro de un fitotoldo tipo capilla ubicado en la comunidad de Mantoclla, Anta. Esta estructura tubular permite la circulación descendente del agua desde la parte superior hacia la inferior, retornando al depósito de almacenamiento. La unidad experimental estará compuesta por 30 plantas de rábano desde la germinación hasta la cosecha.

6.8. Variables a medir.

En la Tabla 7 se presenta la relación de las variables consideradas en el proyecto, organizadas en cuatro categorías principales: ambientales, de la solución nutritiva, fisiológicas y operacionales.

- Variables ambientales: Se incluye la temperatura ambiente, medida mediante un sensor DHT11 instalado dentro del fitotoldo. Esta variable es crítica para el control automático de la recirculación del agua, ya que la activación de la bomba depende directamente de los valores registrados.
- Variables de la solución nutritiva: Se consideran el pH y la conductividad eléctrica (CE), medidas mediante sensores sumergidos en el depósito y flujo de recirculación, respectivamente. Estas variables permiten evaluar la calidad de la solución nutritiva y constituyen parámetros clave en la regulación automatizada mediante inteligencia artificial.
- Variables fisiológicas: Se incluyen el peso fresco de las plantas, registrado al final del ciclo mediante una balanza digital, y el tiempo de cosecha, obtenido de manera manual para determinar la duración del cultivo desde la siembra hasta la cosecha.

- Variables operacionales: Se registran los eventos de activación de bombas, controlados mediante relés conectados a la Raspberry Pi, así como la predicción de la inteligencia artificial, almacenada en los registros del sistema AIoT. Estas variables reflejan el funcionamiento del sistema de control y la toma de decisiones automatizada.

Tabla 7:
Variables del sistema hidropónico

Categoría	Variable	Instrumento / Sensor	Frecuencia de medición	Detalle adicional
Ambientales	Temperatura ambiente (°C)	Sensor DHT11	Ejecución 1 del sistema	Sensor ubicado dentro del fitotoldo. Controla la recirculación del agua automáticamente.
Solución nutritiva	pH	Sensor pH analógico	Ejecución 1 del sistema	Sensor sumergido en el depósito de solución.
	Conductividad eléctrica (CE)	Sensor TDS/EC	Ejecución 1 del sistema	Sensor sumergido en el flujo de recirculación.
Fisiológicas	Peso fresco (g)	Balanza digital	Al final del ciclo	Medición tras la cosecha en todas las plantas.
	Tiempo de cosecha (días)	Registro manual	Una vez, al momento de la cosecha	Se registrará el tiempo desde la siembra hasta la cosecha completa.
Operacionales	Activación de bombas (ON/OFF)	Relé conectado a la Raspberry Pi	Cada evento	Registro digital de eventos en tiempo real.
	Predicción IA (acción sugerida)	Log del sistema AIoT	Cada evento	Salida de modelos de IA integrados en la Raspberry Pi.

Fuente: Elaboración propia

6.9. Etapas de la recolección de datos.

La recolección de datos se organizará en cinco etapas de acuerdo con el desarrollo fenológico del cultivo de rábano:

- Etapa 1: Calibración inicial (día 0–1)

Se realizará la calibración de los sensores de pH, conductividad eléctrica (EC) y temperatura ambiente, utilizando soluciones estándar para asegurar la precisión de los datos recolectados.

- Etapa 2: Germinación y trasplante (días 1–5)

Germinación en bandejas con sustrato y posterior traslado al sistema NFT. Inicia el monitoreo automático y continuo de variables ambientales y de la solución nutritiva.

- Etapa 3: Desarrollo vegetativo (días 6–20)

Seguimiento continuo de las variables ambientales (temperatura) y de la solución (pH y CE). Se registran las mediciones fisiológicas (longitud del bulbo) cada 5 días.

- Etapa 4: Engrosamiento de raíz (días 21–35)

Se continúa el registro de datos automáticos y mediciones fisiológicas. Se evalúa la precisión del sistema inteligente en la regulación autónoma del pH y CE, activando las bombas correspondientes.

- Etapa 5: Cosecha (días 25–35)

Se realiza la medición final de variables fisiológicas (peso fresco, longitud, tiempo de cosecha) y se compara con valores esperados e históricos para determinar el rendimiento del sistema.

6.9.1. Calibración de sensores

Los sensores de pH y conductividad eléctrica (CE) conectados a la Raspberry Pi serán calibrados al inicio de cada fase experimental utilizando soluciones estándar de referencia (pH 4.0, 7.0, 10.0 y soluciones de 1.4 mS/cm). Además, se incorporan sensores precalibrados de respaldo con alta precisión que no intervienen en el control del sistema, sino que se emplean para la verificación de la exactitud de las mediciones realizadas por los sensores operativos. Esta doble medición permitirá calcular el error medio absoluto (MAE) y ajustar parámetros en caso de desviaciones significativas.

6.10. Almacenamiento y análisis de datos.

Los datos recolectados por los sensores serán almacenados automáticamente en archivos .JSON estructurados desde la Raspberry Pi, permitiendo su posterior procesamiento. Se utilizarán herramientas como Python, con librerías como pandas, matplotlib y scipy, para realizar el análisis estadístico, la visualización de datos y la evaluación del comportamiento del sistema.

El análisis incluirá:

- Verificación de cumplimiento de los rangos óptimos de cultivo para pH (5.5–6.5), CE (1.5–2.5 mS/cm) o TDS (850 ppm-950 ppm).
- Verificación constante de la temperatura (18–22.5°C) para la gestión del modo de funcionamiento de la bomba de recirculación, 15 min/h encendida y 15min/h apagada si la temperatura <22.5 °C o continua sin interrupción si la temperatura >22.5 °C, esta estrategia ayudara al ahorro del agua y batería.

6.11. Técnicas de análisis de datos

6.11.1. Procesamiento y análisis de datos

- Los datos recogidos serán procesados utilizando Python 3.11 como entorno principal de análisis. Se emplearán las siguientes bibliotecas especializadas:
- matplotlib para visualización de datos.
- numpy para cálculos numéricos de soporte.
- scikit-learn para análisis estadístico, incluyendo regresión lineal, validación cruzada y métricas de error (MAE, RMSE).

6.11.2. Manejo de datos faltantes y valores atípicos

Durante el procesamiento de los datos, puede ocurrir que algunas mediciones no se registren correctamente (por ejemplo, si un sensor falla temporalmente). Para estos casos:

- Si falta un pequeño número de datos (menos del 5% del total), se reemplazarán automáticamente por el promedio del resto de valores de esa misma variable.
- Los datos faltantes en una misma variable, se descartará para evitar resultados erróneos.
- En cuanto a los valores atípicos (valores que se salen demasiado del rango esperado), estos serán identificados como errores o mediciones anormales, serán eliminados antes del análisis estadístico.
- Para asegurar valores realistas, se utilizará VecNormalize, que se aplica al entorno para normalizar observaciones y no limitarse a una única lectura de los sensores.

7. Desarrollo de tesis

7.1. Metodología de desarrollo basada en Hardware–Software Co-Design y SCRUM

Para el desarrollo del sistema de automatización NFT para el cultivo de rábanos, se empleará una metodología mixta compuesta por el enfoque Hardware–Software Co-Design y la filosofía ágil Scrum, adaptada para un solo desarrollador. Esta combinación permitió una integración progresiva y coordinada del hardware (sensores, actuadores, energía) con el software (entorno virtual, lógica de control, inteligencia artificial), permitiendo validar cada fase en entornos simulados antes de su despliegue físico.

Objetivo general de la metodología:

Desarrollar un sistema inteligente de automatización de parámetros clave (pH, CE/TDS, temperatura) en un cultivo hidropónico NFT, integrando hardware y software de forma simultánea y progresiva, mediante ciclos iterativos de desarrollo y validación. La integración de estas fases y su relación con el enfoque propuesto se sintetiza en la Ilustración 28.

En el proyecto se integra la metodología ágil Scrum con el enfoque Hardware–Software Co-Design para gestionar de forma iterativa y ordenada todo el proceso de desarrollo. A través de un backlog inicial, se definen requerimientos como la lectura de sensores de pH, temperatura y conductividad eléctrica, así como el control de las bombas peristálticas y la bomba de recirculación de agua. Estos se abordan en sprints secuenciales: por ejemplo, en el Sprint 1 se desarrolla la especificación del sistema, en el Sprint 2 se programa la lógica para la activación de bombas, y en el Sprint 3 se integran y prueban las lecturas en la pantalla LCD. Cada sprint permite avances incrementales, manteniendo flexibilidad y adaptabilidad ante ajustes necesarios durante el desarrollo.

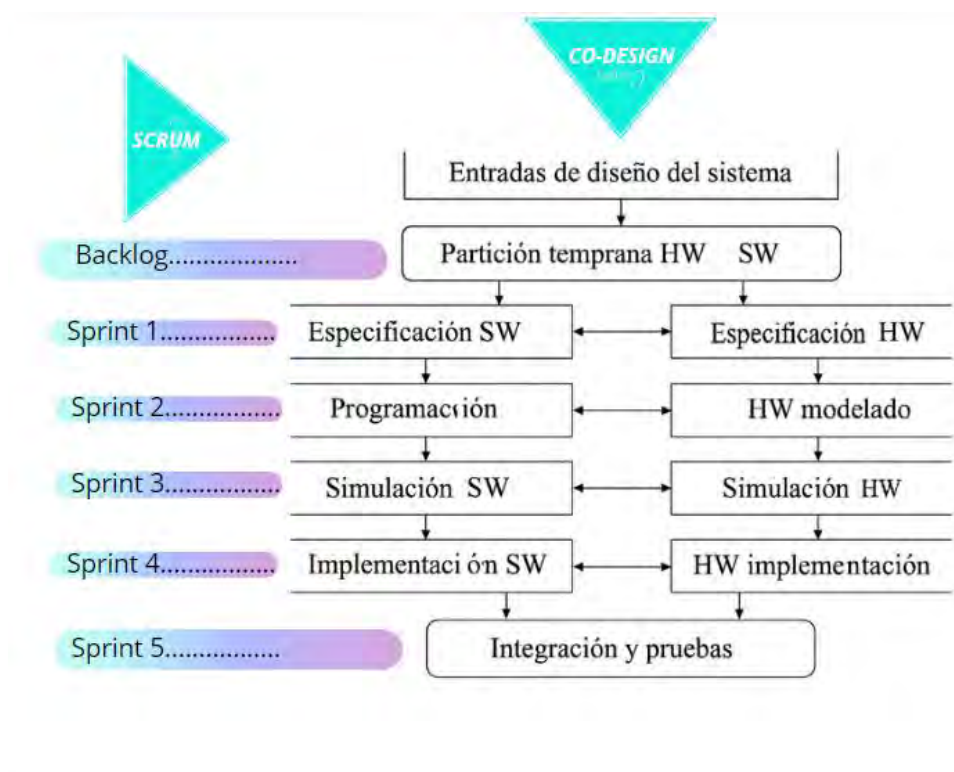
Por su parte, el Co-Design asegura que las etapas de especificación, modelado, simulación e implementación de hardware y software se desarrollen en paralelo y se validen progresivamente. Por ejemplo, mientras en software se programa la predicción de nutrientes mediante IA, en hardware se modela la conexión de los sensores y relés; luego ambos se simulan en conjunto antes de su implementación física. Esta integración permite que al final de cada sprint existan entregables funcionales, que posteriormente se integran y prueban en condiciones reales, asegurando una implementación coordinada y eficiente del sistema hidropónico inteligente.

7.1.1. Mapeo estructurado del desarrollo AIoT integrando dimensiones de Co-Design y ciclos

Scrum

Ilustración 28:

Co-Design + Scrum: Flujo del desarrollo modular del sistema AIoT



Fuente: Elaboración propia

7.1.2. Gestión visual del proyecto mediante Trello bajo enfoque Scrum + Co-Design

La Ilustración 29 muestra la aplicación Trello, utilizada para la planificación del proyecto bajo los enfoques de scrum y co-design, facilitando la organización y seguimiento de tareas.

Ilustración 29:
Aplicación de Trello en la planificación basada en Scrum y Co-Design



Fuente: Elaboración propia

7.1.3. Aplicación de ClickUp como herramienta de planificación y control del proyecto

La Ilustración 30 presenta la aplicación ClickUp, empleada para el cronograma de actividades del proyecto, permitiendo gestionar plazos y controlar el avance.

Ilustración 30:
Cronograma de actividades de desarrollo, diagrama gantt del proyecto



Fuente: Elaboración propia

A continuación, se detalla el plan de trabajo organizado en seis sprints, cada uno con objetivos, actividades y entregables definidos.

7.1.4. *Sprint 0, Análisis del sistema y partición temprana HW/SW*

Objetivo: Establecer los requerimientos funcionales, técnicos y contextuales del sistema a implementar, así como definir la distribución de responsabilidades entre hardware y software, siguiendo un enfoque de desarrollo conjunto (Hardware–Software Co-Design).

Justificación del sprint:

Este primer sprint permitirá sentar las bases del proyecto, definiendo qué se necesita y cómo se estructurará la solución. Si bien los conceptos tecnológicos ya han sido abordados en el marco teórico, aquí se realiza su adaptación práctica al caso específico del sistema NFT para rábanos en la comunidad de Mantoclla.

Actividades desarrolladas:

1. Identificación del problema técnico-operativo

- Se observó que los fitotoldos ya existían, en el cual ya realizaban actividades agrícolas de manera tradicional en suelo y algunos sistemas de hidroponía de raíces flotantes con ajuste de parámetros clave (pH, EC/TDS) de forma manual e imprecisa.
- Se evidenció un uso ineficiente del agua al usar métodos tradicionales de riego (por inundación o por goteo), Además, aunque existían algunos sistemas hidropónicos de raíz flotante, estos también usan bastante agua.

- Se visualizó que se empleaban sensores del tipo lápiz precalibrados. Sin embargo; estos dispositivos requieren recalibración cada cierto tiempo para validar las lecturas.
- Se identificó que, el ajuste de parámetros clave (pH, EC/TDS) se realizaba de forma manual lo que podría llevar a sobredosis de acidificante, base o nutrientes, lo que puede ser un riesgo para el sistema hidropónico como se puede observar en la Ilustración 31.

Ilustración 31:

Medición y ajuste manual de parámetros pH y EC/TDS



Fuente: Elaboración propia

- La escasez de agua en la zona ha ocasionado el abandono de los fitotoldos, situación que pone en riesgo la continuidad de la producción agrícola y la seguridad alimentaria de las familias; además, implica la pérdida de la inversión realizada y limita la capacidad de los agricultores para enfrentar la variabilidad climática y generar ingresos sostenibles.

Ilustración 32:

Fitotoldos abandonados por escases hidrica



Fuente: Elaboración propia

2. Levantamiento de requerimientos técnicos

Se identificó la necesidad de monitorear y regular parámetros clave como parte de una estrategia de ahorro hídrico. Esta medida sustenta la propuesta de un sistema hidropónico tipo

NFT, orientado a optimizar el uso del recurso agua. Con ello se busca garantizar la eficiencia productiva y la sostenibilidad del cultivo.

- pH de la solución nutritiva.
 - a. El pH regula la disponibilidad de nutrientes para las raíces. Valores fuera del rango óptimo pueden bloquear la absorción de elementos esenciales, generando deficiencias o toxicidades.
- Conductividad eléctrica (CE) o TDS.
 - a. La EC permite estimar la concentración de nutrientes en la solución. Mantenerla dentro de rangos ideales asegura un crecimiento uniforme sin necesidad de reemplazar constantemente la solución nutritiva.
 - b. Un control automático evita sobredosificación y reduce la frecuencia de renovación del agua, mejorando la eficiencia hídrica.
- Temperatura ambiente (condición para la recirculación de la bomba de agua).
 - a. La temperatura influye directamente en la evapotranspiración, la oxigenación del agua y la velocidad de absorción de nutrientes.
 - b. Cuando la temperatura ambiente supera los 22 °C, se incrementa el riesgo de estrés térmico en raíces. En estos casos, se activa automáticamente la bomba de recirculación para enfriar el agua.
 - c. En temperaturas más bajas, se reduce la frecuencia de recirculación para ahorrar energía y agua.

Requisitos adicionales:

- Fuente de energía solar.
 - a. En comunidades rurales como Mantoclla, el acceso a electricidad es limitado o inestable.
 - b. El uso de un panel solar con batería e inversor garantiza la operación continua del sistema, incluso durante cortes de red.
- Temporizador de energía.
 - a. Se emplea para definir ventanas operativas seguras (ej. de 9 am a 6 pm), evitando funcionamiento nocturno innecesario que podría sobrecargar la batería o afectar la estabilidad térmica.
- Automatización autónoma con decisiones locales (basadas en IA).
 - a. La inteligencia artificial permite adaptar las decisiones del sistema a condiciones variables del entorno, optimizando la operación sin intervención humana constante.
 - b. Esto es especialmente útil en zonas donde los agricultores no tienen conocimientos técnicos avanzados o disponibilidad para monitoreo permanente.

3. Selección de componentes tecnológicos

A partir del análisis, se seleccionaron los siguientes dispositivos.

- Plataforma de control: Raspberry Pi 4 modelo B con sistema operativo Raspbian Lite una distribución basada en Debian que tiene como lenguaje nativo Python, que nos ayudara a desarrollar el código asociado al sistema AIoT.

- Sensores:
 - a) Sensor de pH analógico con interfaz BNC.
 - b) Sensor EC/TDS compatible con señales analógicas.
 - c) Sensor DHT11 para temperatura ambiente.
 - d) Sensor de nivel de agua
- Conversión analógica-digital: módulo ADS1015 para interpretar señales analógicas desde los sensores.
- Actuadores:
 - a) Bombas peristálticas (para regulación de pH y nutrientes).
 - b) Bomba de recirculación (alimentada con energía solar).
 - c) Bomba de reposición de agua.
 - d) Interfaz de salida: Pantalla I2C 16x2 para mostrar valores actuales.
 - e) Control de potencia: Módulos de relé 5V–12V para el control de bombas.

Todos los componentes seleccionados fueron elegidos por su compatibilidad directa con la Raspberry Pi, su bajo consumo energético y su facilidad de integración mediante interfaces estándar como I2C, GPIO y entradas analógicas digitalizadas mediante el módulo ADS1015. Además, presentan la ventaja de ser fácilmente adquiribles en plataformas globales de comercio electrónico como AliExpress, Amazon y Alibaba, lo que garantiza su disponibilidad incluso en contextos rurales con acceso limitado a tecnología especializada.

Su carácter modular, económico y ampliamente documentado en la comunidad maker y educativa, facilita tanto la implementación como el mantenimiento del sistema, permitiendo que la solución propuesta sea escalable, replicable y sostenible en zonas altoandinas y similares.

4. Partición temprana entre hardware y software

Aunque aún no se han adquirido todos los componentes físicos, se ha realizado una partición temprana planificada entre hardware y software, de acuerdo con los principios del enfoque Hardware–Software Co-Design. Esta metodología promueve la colaboración simultánea entre ambas disciplinas desde las etapas iniciales del diseño, evitando que el desarrollo de una dependa por completo de la finalización de la otra.

La partición anticipada permite definir con claridad qué elementos serán gestionados por el hardware físico (sensores, actuadores, relés, alimentación solar) y cuáles por el software (lectura de sensores, control de dispositivos, toma de decisiones basada en IA). Esta división no implica un desarrollo aislado, sino una coordinación continua y validación mutua, donde el avance en el software —por ejemplo, el entorno simulado y el modelo de IA— permite probar y ajustar algoritmos incluso antes de tener el sistema físico completo.

Este enfoque reduce riesgos de integración futura o en el mismo proceso, permite detectar fallos de diseño con antelación y acelera la validación funcional del sistema una vez que los componentes estén disponibles. En ese sentido, el Hardware–Software Co-Design resulta especialmente útil para proyectos de automatización con inteligencia artificial, sistemas IoT y sistemas embebidos, donde las decisiones del software deben adaptarse dinámicamente al comportamiento real del hardware.

Hardware:

- Cableado y conexión de sensores.
- Ensamblaje de relés, bombas y alimentación solar.
- Validación de funcionamiento físico de componentes.

Software:

- Desarrollo del entorno simulado HydroponicEnv.
- Codificación en Python para la lectura de sensores y control de GPIO.
- Entrenamiento del modelo SAC para tomar decisiones automáticas.

Resultados del sprint:

Se obtuvo una arquitectura inicial del sistema físico y lógico, identificando los elementos esenciales y sus relaciones. Esta base permitió avanzar en el diseño detallado y montaje prototípico durante el Sprint 1.

7.1.5. Sprint 1: Especificación detallada de hardware y software

Objetivo: Documentar en profundidad las funciones específicas que desempeñará cada componente del sistema y definir formalmente su estructura de implementación, tanto a nivel físico (hardware) como lógico (software).

Justificación del sprint:

Una vez definidos los requerimientos generales en el Sprint 0, el siguiente paso fue transformar dichos requerimientos en especificaciones técnicas claras. Este sprint permitió

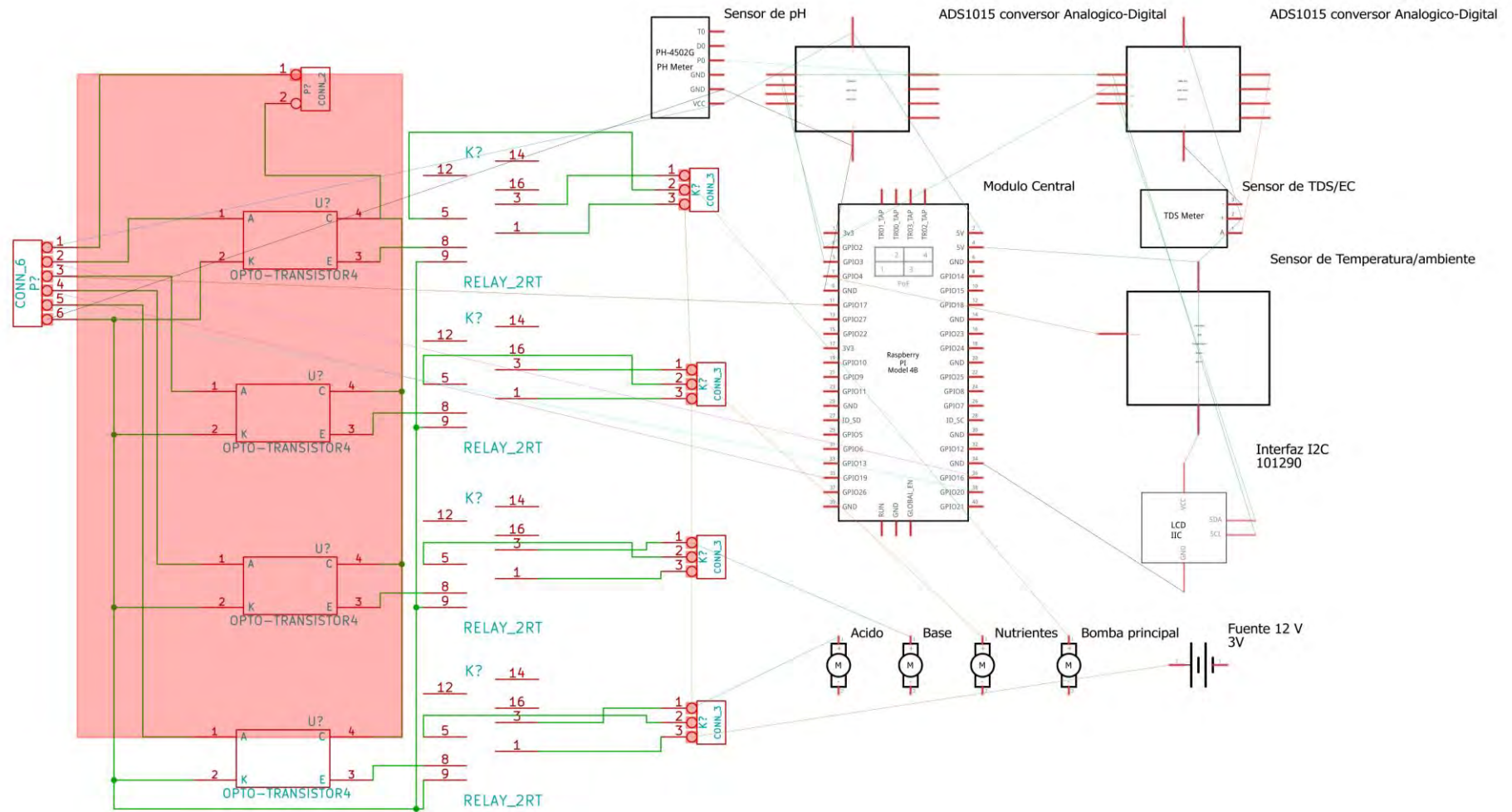
construir los esquemas eléctricos y lógicos, además de establecer cómo interactuarán entre sí los sensores, actuadores y la unidad de procesamiento (Raspberry Pi), tanto en el entorno real como en el virtual.

Actividades desarrolladas:

Especificación de hardware (HW)

- Se elaboró el diagrama físico y lógico de conexión que detalla la ubicación de cada componente y su vinculación con los pines GPIO de la Raspberry Pi. Esta representación gráfica permitió organizar de forma clara la disposición de los elementos, garantizando un manejo ordenado, seguro y eficiente del sistema electrónico. Asimismo, la estructuración visual facilitó la comprensión del flujo de conexiones y la relación entre los módulos utilizados, optimizando tanto el proceso de montaje como las tareas de mantenimiento rutinario.
- Además, contar con este diagrama detallado posibilita identificar rápidamente cualquier cable asociado a un pin específico, lo que resulta especialmente útil ante casos de deterioro, ruptura o necesidad de reemplazo. Tal como se muestra en las Ilustraciones 33 y 34, se aprecia la disposición y nomenclatura correspondiente a la Raspberry Pi 4 Modelo B, lo cual sirve como referencia para verificar las conexiones, prevenir errores y asegurar el correcto funcionamiento del sistema durante su operación.

Ilustración 33:
Diagrama físico del sistema AIoT



Fuente: Elaboración propia

Ilustración 34:
Diagrama lógico del sistema AIoT

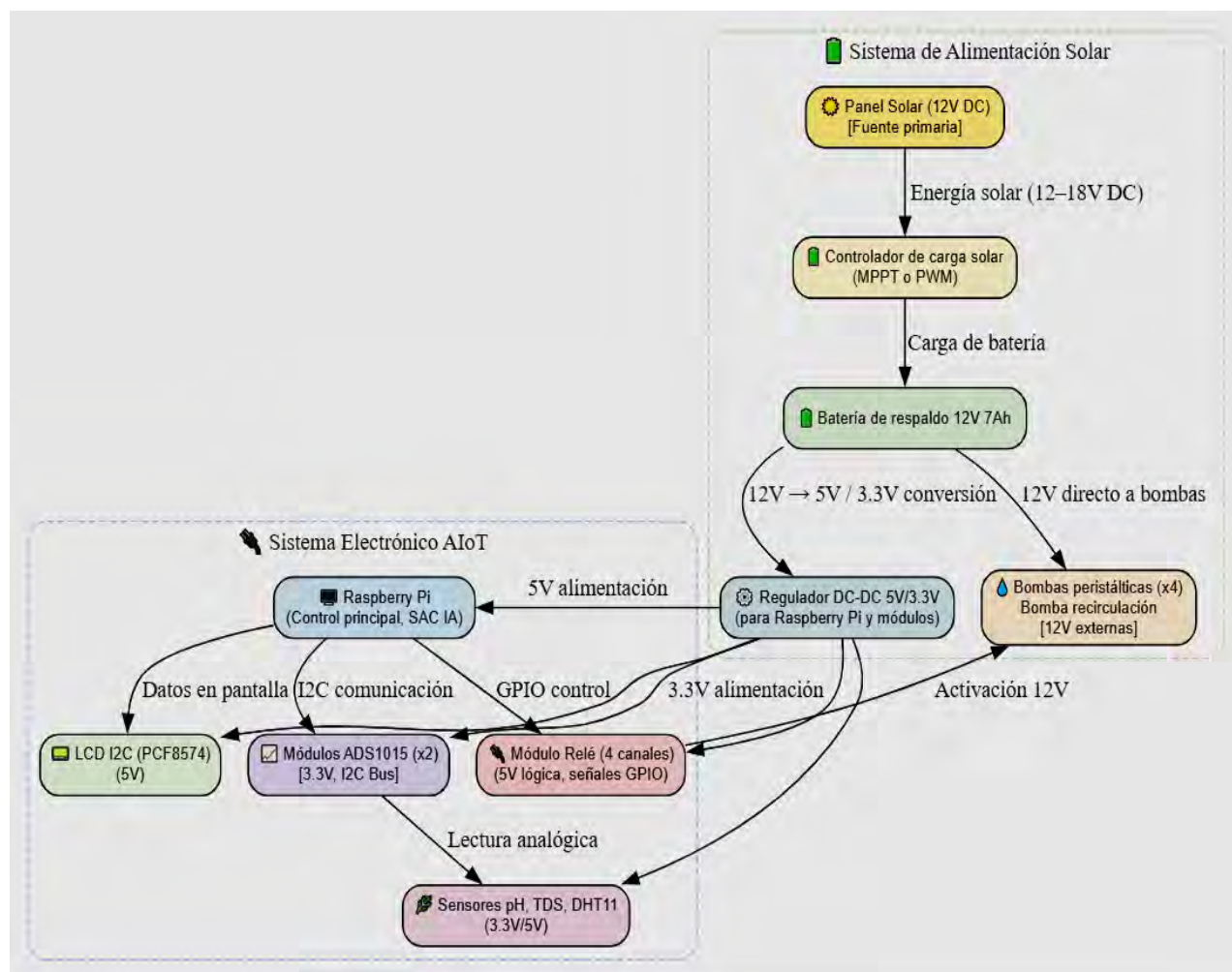


Fuente: Elaboración propia

- Se elaboró el diagrama de conexión eléctrica correspondiente a los componentes del sistema de alimentación. Este esquema permite visualizar la disposición y relación entre cada elemento eléctrico. Su representación se muestra en la Ilustración 35.

Ilustración 35:

Conexión eléctrica de componentes



Fuente: Elaboración propia

- Se asignaron pines específicos para:
 - Entradas analógicas vía ADS1015 (pH, EC/TDS).
 - Lectura de temperatura mediante sensor digital DHT11.

c) Salida a relés para el control de bombas (pines 16, 17 y 19).

d) Comunicación I2C para la pantalla LCD.

1. Selección y adquisición de sensores y módulos:

- Sensor de pH analógico con interfaz BNC, Sensor EC/TDS compatible con señales analógicas
- Módulo ADS1015, que permite capturar las señales analógicas con resolución de 12 bits.
- Sensor DHT11, económico y confiable para monitoreo ambiental.
- Pantalla LCD I2C 16x2, ideal para sistemas de bajo consumo de recursos.
- Módulos relé de 5V-12V, necesarios para conmutar bombas peristálticas y de recirculación desde la Raspberry Pi.

2. Estándar de montaje:

- Se adoptó el uso de protoboard de 170 puntos para las pruebas iniciales, con cables Dupont para conexiones temporales, con miras a una futura soldadura sobre PCB para su versión final.

Especificación de software (SW)

Diseño del entorno virtual HydroponicEnv:

- Se especifica un entorno de simulación personalizado que replica las características reales del sistema NFT.
- Parámetros definidos en la simulación:
 - a) Flujo de solución nutritiva (ml/segundo) en cada bomba.

- b) Reacción del pH a la adición de ácido o base.
 - c) Incremento de EC según volumen de nutrientes.
 - d) Tiempos de espera y activación estratégica para evitar sobrecorrecciones.
- Descripción del entorno HydroponicEnv personalizado

Se ha desarrollado un entorno personalizado basado en la librería OpenAI Gym, denominado HydroponicEnv, que simula el comportamiento de un sistema hidropónico NFT con base en tres variables clave: pH y conductividad eléctrica (EC/TDS).

Estado del entorno.

El estado S está compuesto por:

- pH: entre 2.5 y 9.5
- ppm: partes por millón (rango típico: 400 – 1000 ppm)
- temperatura: en grados Celsius (15–30 °C)

Ejemplo: `observation = np.array([ph, EC, temperatura])`

Acciones del agente.

1. `a[0]`: Bomba de pH

- `a[0] < -0`: dosifica ácido
- `a[0] > 0`: dosifica alcalino
- `a[0] = 0`: no actúa

2. $a[1]$: Bomba de nutrientes

- $a[1] > 0$: incrementa nutrientes
- $a[1] = 0$: no actúa
- $a[1] < 0$: incrementa agua

3. $a[2]$: Recirculación de agua

- $a[2] \geq 0$: bomba sigue encendida
- $a[2] < 0$: se apaga por 5 minutos, luego se retoma el ciclo de 15 min

Sistema de recompensas y penalizaciones.

El agente realizará una acción continua $a \in \mathbb{R}^3$ que impacta el entorno hidropónico. Cada componente de la acción tiene efectos definidos sobre el pH, ppm y temperatura/recirculación según las condiciones ideales del sistema los cuales están detallados en la Tabla 8, y la recompensa guía al agente a mantener condiciones óptimas.

Tabla 8:
Condiciones ideales del entorno para rábanos

Variable	Rango óptimo
pH	5.5 – 6.5
EC (ppm)	850 – 950 ppm
Temperatura	18 °C – 22.5 °C

Fuente: Elaboración propia

Tabla 9:
Función de recompensa y penalización para cada variable

Componente	Condición	Acción esperada (a[i])	Descripción	Recompensa / Penalización
pH		pH - ph_obj	< 0.05`	a[0] = 0
	pH < ph_obj	a[0] > 0	Dosifica base (aumenta pH) usando k_ph_base	Penalización reducida si corrige bien
	pH > ph_obj	a[0] < 0	Dosifica ácido (disminuye pH) usando k_ph_acid	Penalización reducida si corrige bien
EC (ppm)		EC - ec_obj	< 10`	a[1] = 0
	EC < ec_obj	a[1] > 0	Agrega nutrientes (aumenta EC) usando k_ec_nutrients	Penalización reducida si corrige bien
	EC > ec_obj	a[1] < 0	Agrega agua destilada (reduce EC) usando k_agua_destilada	Penalización reducida si corrige bien
Acciones extremas	abs(a[0]) > 0.8 o abs(a[1]) > 0.8	—	Acción muy agresiva	-0.5 penalización
Eficiencia global	pH y EC en rango objetivo y a ≈ [0,0]	—	Estado óptimo sin intervención	+2.0 bonus adicional
pH		pH - ph_obj	< 0.05`	a[0] = 0

Fuente: Elaboración propia

1. Definición del algoritmo de inteligencia artificial:

- Se seleccionó el algoritmo *Soft Actor-Critic* (SAC) por su capacidad para aprender políticas óptimas en ambientes continuos y su buen desempeño en entornos con múltiples variables a regular.
- Se establecieron las recompensas y penalizaciones del entorno:
 - a) Recompensa alta por mantener pH y EC dentro de rangos ideales para rábanos.
 - b) Penalización por excesos, tiempos inactivos innecesarios o variaciones abruptas.

Estos se pueden verificar en la Tabla 9.

2. Estructura de control lógico:

- Se definirá el flujo de información:
 - a) Lectura de sensores - envío al modelo SAC - decisión de acción - activación de actuadores (bombas).
- En el desarrollo del sistema hidropónico inteligente se emplearán diversas librerías de programación que permitirán la adquisición de datos, el control de dispositivos y el entrenamiento de modelos de inteligencia artificial. Se utilizarán *gymnasium* para la simulación del entorno de aprendizaje por refuerzo; *numpy* y *pandas* para cálculos y manejo de datos; *matplotlib.pyplot* para visualización de resultados; *time* y *datetime* para control temporal; *os*, *sys*, *subprocess* y *json* para gestión de archivos y datos; *board*, *busio*, *adafruit_ads1x15* y *analog_in*, *adafruit_dht* y *RPi.GPIO* para la interacción con sensores y actuadores; *RPLCD.i2c* para la pantalla LCD; *stable_baselines3* con SAC, *DummyVecEnv* y

VecNormalize para entrenamiento del modelo; y HydroponicEnv, el entorno personalizado de cultivo hidropónico.

En conjunto, el uso de estas librerías permite integrar en un mismo sistema la adquisición y procesamiento de datos, la interacción con sensores y actuadores, la visualización de resultados y el entrenamiento de modelos de inteligencia artificial, logrando así un sistema hidropónico inteligente capaz de operar de manera autónoma, eficiente y adaptable a condiciones reales de cultivo., esto se puede observar en la Ilustración 36.

Ilustración 36:

Librerías utilizadas en el proyecto

```

1 #Descripción de las librerías de programación utilizadas en el desarrollo e
2 implementación del entorno simulado y entrenamiento del modelo SAC:
3 import gymnasium as gym
4 import numpy as np
5 import matplotlib.pyplot as plt
6 #Las librerías empleadas en el desarrollo del sistema cumplen funciones
7 específicas tanto a nivel de hardware como de procesamiento de datos e
8 inteligencia artificial:
9 import time
10 import os
11 import board
12 import busio
13 import adafruit_ads1x15.ads1015 as ADS
14 from adafruit_ads1x15.analog_in import AnalogIn
15 import adafruit_dht
16 import RPi.GPIO as GPIO
17 from RPLCD.i2c import CharLCD
18 from stable_baselines3 import SAC
19 from stable_baselines3.common.vec_env import DummyVecEnv, VecNormalize
20 import numpy as np
21 from HydroponicEnv import HidroponicoEnv
22 import datetime
23 import logging
24 import subprocess
25 import sys
26 import json
27 import pandas as pd
28 import matplotlib.pyplot as plt

```

Fuente: Elaboración propia

3. Planificación y cronograma:

- Se redactará un backlog personal con tareas distribuidas semanalmente.
- Se establecerá hitos de validación:
 - a) Validación de lectura de sensores por separado.
 - b) Ejecución de acciones sobre actuadores.
 - c) Integración inicial de decisiones simuladas con entorno virtual.

Resultados del sprint:

Este sprint concluirá con la documentación detallada del diseño eléctrico y lógico del sistema, además del entorno virtual preparado para comenzar las pruebas. Con ello, se sentaron las bases para la fase de implementación inicial en protoboard y entrenamiento del modelo en el siguiente sprint.

7.1.6. Sprint 2: Programación del entorno simulado y modelado del hardware

Objetivo: Construir el entorno de simulación que represente el sistema físico NFT, y realizar el montaje físico inicial del hardware en protoboard para pruebas preliminares.

Justificación del sprint:

Este sprint permitirá dar vida al sistema en dos planos paralelos: el físico (hardware) y el virtual (entorno simulado). Por un lado, se requería montar y verificar conexiones físicas antes de su instalación definitiva. Por otro, era indispensable crear un entorno virtual realista que representara las reacciones del sistema NFT ante distintas acciones, con el fin de entrenar el modelo de IA antes de exponerlo a condiciones reales.

Actividades desarrolladas:

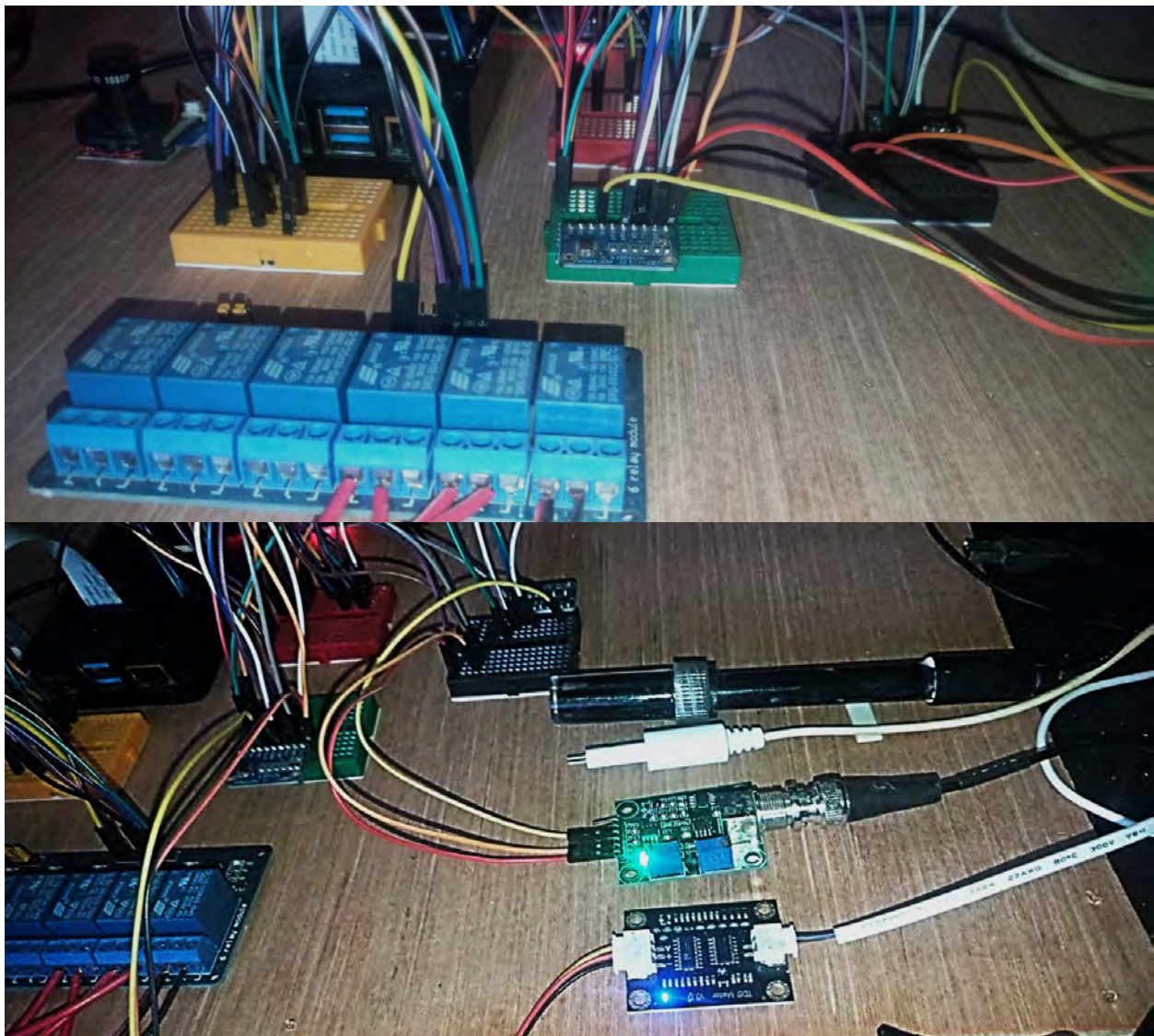
Hardware: montaje y pruebas físicas

1. Montaje inicial en protoboard:

- Se ensamblará el sistema con cables Dupont, placa de pruebas de 170 puntos, relés, sensores y bombas como se puede verificar en la Ilustración 37.

Ilustración 37:

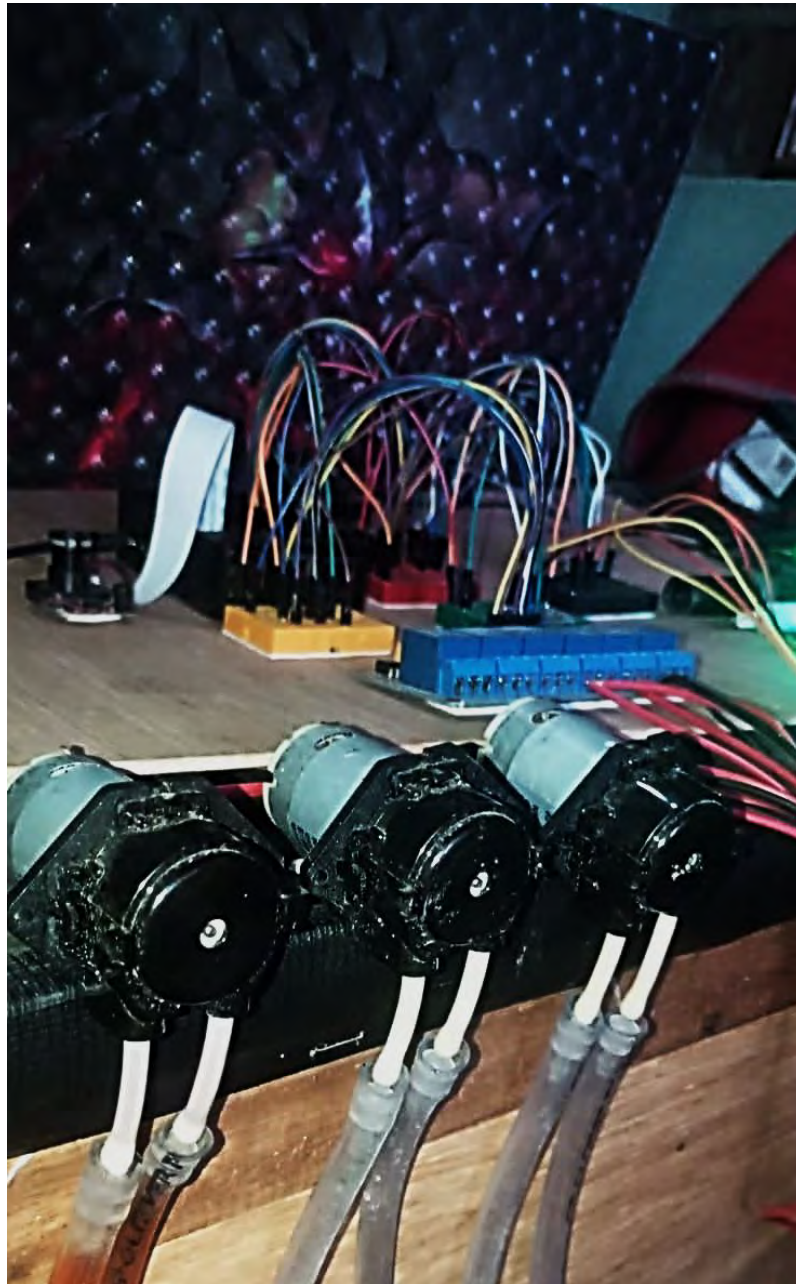
Conexión de sensores y módulos



Fuente: Elaboración propia

- La bomba de recirculación, la bomba de pH y la de nutrientes se conectaron a través del módulo de relé a los pines GPIO 16, 17 y 19 respectivamente de la Raspberry Pi como se observar en la Ilustración 38.

Ilustración 38:
Conexión de bombas peristálticas



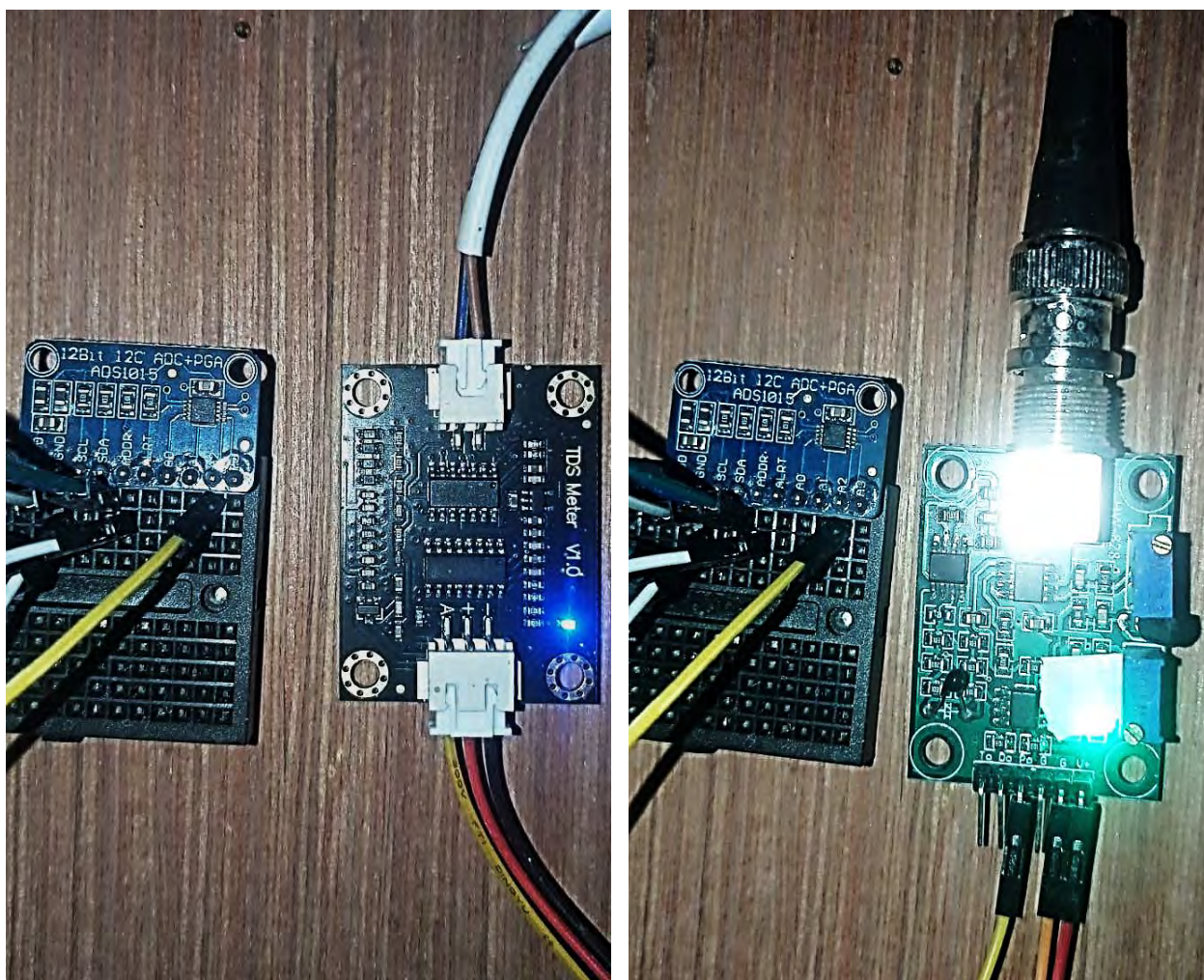
Fuente: Elaboración propia

2. Conexión de sensores reales:

- Sensor de pH y EC/TDS conectados al módulo ADS1015, mostrándose en la Ilustración 39, en la izquierda se muestra el módulo ADS1015 conectado al sensor de EC/TDS, y al derecho de la misma forma el sensor de pH.

Ilustración 39:

Sensor de pH y EC/TDS conectados a modulo ADS1015



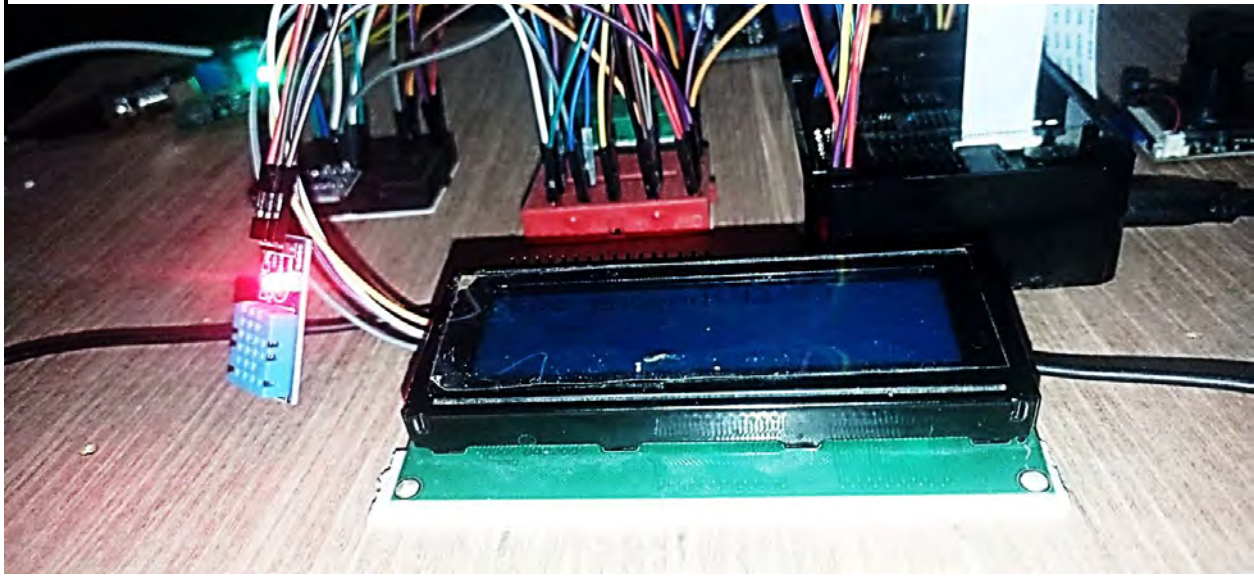
Fuente: Elaboración propia

- Sensor de temperatura DHT11 conectado al pin digital correspondiente como se puede ver en la Ilustración 39.

- Pantalla LCD I2C 16x2 conectada para mostrar en tiempo real las lecturas de sensores el cual se puede verificar en la Ilustración 40.

Ilustración 40:

Sensor de temperatura DHT11 y Pantalla LCD I2C

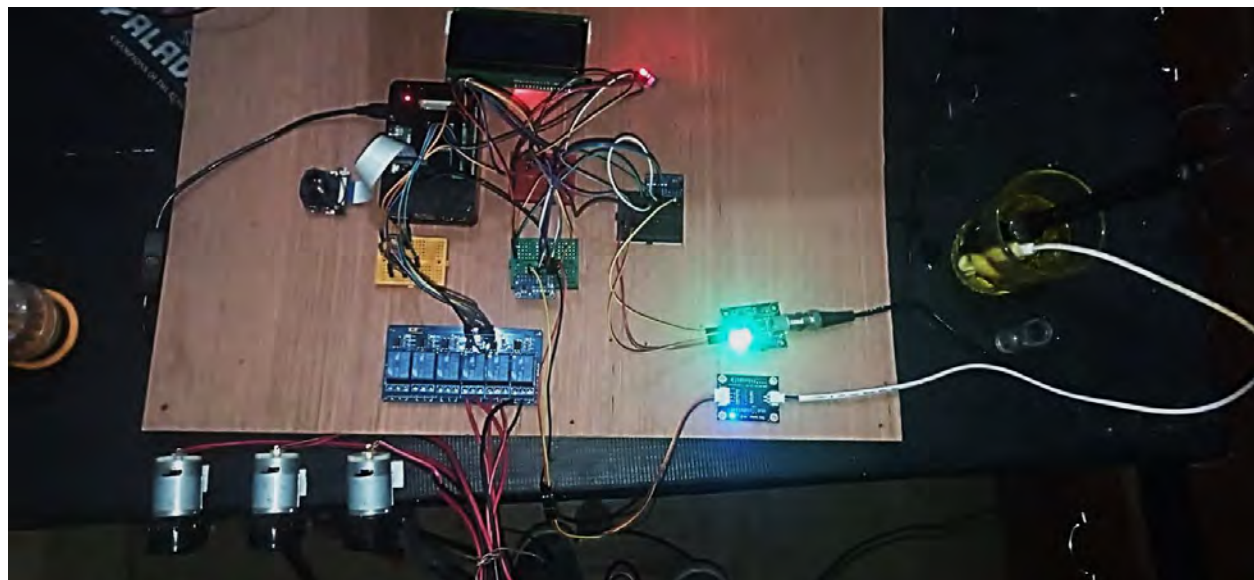


Fuente: Elaboración propia

- Todos los componentes conectados con éxito se pueden observar en la Ilustración 41.

Ilustración 41:

Sistema físico de conexiones completo



Fuente: Elaboración propia

3. Instalación del sistema de alimentación:

- Se conectará la Raspberry Pi a una fuente de energía basada en:
 - a) Panel solar de 12V con controlador de carga.
 - b) Batería recargable de ciclo profundo.
 - c) Inversor para convertir a 220V/12V en caso de respaldo.
 - d) Temporizador digital programado para activar el sistema de 9:00 a.m. a 6:00 p.m.

Los cuales se puede observar en la Ilustración 42, el cual se detalla a continuación:

- La imagen A, representa el sistema de alimentación completo.
- La imagen B es el controlador de carga que evita la sobresaturación de carga, evitando el deterioro y ampliando la vida útil de la batería.
- La imagen C es el panel solar instalado encima del fitotolod, de modo que tenga una buena recepción de luz solar.
- La imagen D, es la batería el cual es cargada por el panel solar el cual puede proveer entre 72-96 horas dependiendo de las condiciones ambientales de los días.

En conjunto, este sistema de alimentación basado en energía solar garantiza autonomía energética al proveer electricidad continua para los sensores y actuadores; reduce la dependencia de la red eléctrica y, por lo tanto, los costos de operación; contribuye a la sostenibilidad ambiental al emplear una fuente renovable; y mejora la confiabilidad del sistema agrícola, al asegurar un funcionamiento estable incluso en zonas rurales con limitado acceso a energía convencional. Este

montaje simula condiciones reales de operación en campo, considerando zonas sin acceso estable a la red eléctrica.

Ilustración 42:
Montaje de sistema de alimentación de energía



Fuente: Elaboración propia

4. Pruebas físicas iniciales:

Estas pruebas nos servirán como verificación y validación de las lecturas de los sensores y actuadores, de modo que se pueda verificar el funcionamiento correcto de todos los componentes conectados.

- Se verificará el funcionamiento de los relés al activar y desactivar manualmente las bombas desde la Raspberry como se puede observar en la Ilustración 43.

Ilustración 43:

Verificación de activación de bombas

```

1 def activar_bomba(pin, nombre, accion, max_ml, ml_por_segundo=1.0):
2     """Activa una bomba con seguridad y registro científico"""
3     # Convertir a tipos nativos de Python
4     accion = float(accion)
5     ml = abs(accion) * max_ml
6     tiempo_operacion = ml / ml_por_segundo
7
8     if ml < 0.1: # Ignorar acciones muy pequeñas
9         logger.info(f"Acción {nombre} muy pequeña ({ml:.2f} ml),
10             omitiendo")
11         return 0.0
12
13     # Limitar tiempo máximo por seguridad
14     tiempo_operacion = min(tiempo_operacion, 5.0)
15
16     logger.info(f"Activando {nombre} ({ml:.2f} ml,
17         {tiempo_operacion:.1f}s)")
18     # Encender bomba
19     GPIO.output(pin, GPIO.LOW)
20     time.sleep(float(tiempo_operacion))
21     # Apagar bomba
22     GPIO.output(pin, GPIO.HIGH)
23     # Esperar 5 segundos para mezcla
24     logger.info("Esperando 5s para mezcla...")
25     time.sleep(5)

```

```

(lcd_env) LENOVO@raspberrypi:~ $ python 3bombas.py
/home/LENOVO/3bombas.py:18: RuntimeWarning: This channel is already in use,
rnings.
  GPIO.setup(pin, GPIO.OUT, initial=GPIO.HIGH)
Prendiendo bomba 1 por 8 segundos
Apagando bomba 1
Esperando 2 segundos antes de continuar...

Prendiendo bomba 2 por 8 segundos
Apagando bomba 2
Esperando 2 segundos antes de continuar...

Prendiendo bomba 3 por 8 segundos
Apagando bomba 3
Esperando 2 segundos antes de continuar...

GPIO limpiado y programa finalizado.
(lcd_env) LENOVO@raspberrypi:~ $ █

```

Fuente: Elaboración propia

- Se comprobará la recepción de señales de los sensores (lectura de voltajes) a través del canal I2C del ADS1015 el cual se puede comprobar en las Ilustraciones 44 e Ilustración 45.

Ilustración 44:

Código para la recepción de sensores de pH, TDS/EC, temperatura y humedad

```

1  # =====
2  # CONFIGURACIÓN DE HARDWARE
3  # =====
4  # Configuración de GPIO
5  GPIO.setmode(GPIO.BCM)
6  BOMBA_ACIDO = 16
7  BOMBA_BASE = 17
8  BOMBA_NUTRIENTES = 19
9  BOMBA_AGUA = 20
10 GPIO.setup(BOMBA_ACIDO, GPIO.OUT, initial=GPIO.HIGH)
11 GPIO.setup(BOMBA_BASE, GPIO.OUT, initial=GPIO.HIGH)
12 GPIO.setup(BOMBA_NUTRIENTES, GPIO.OUT, initial=GPIO.HIGH)
13 GPIO.setup(BOMBA_AGUA, GPIO.OUT, initial=GPIO.HIGH)
14 # Inicializar sensores
15 try:
16     i2c = busio.I2C(board.SCL, board.SDA)
17     ads_tds = ADS.ADS1015(i2c, address=0x49)
18     ads_ph = ADS.ADS1015(i2c, address=0x48)
19     sensor_tds = AnalogIn(ads_tds, ADS.P0)
20     sensor_ph = AnalogIn(ads_ph, ADS.P0)
21     dht_device = adafruit_dht.DHT11(board.D4)
22     lcd = CharLCD(i2c_expander="PCF8574",address=0x27, port=1,
23     cols=16,rows=2)
24
25     logger.info("Sensores y LCD inicializados")
26 except Exception as e:
27     logger.error(f"Error inicializando hardware: {e}")
28     sys.exit(1)
29 def leer_sensores():
30     """Lee los sensores con manejo de errores robusto"""
31     try:
32         raw_ph = sensor_ph.voltage
33         raw_tds = sensor_tds.voltage
34         temperatura = dht_device.temperature or 25.0
35
36         ph = voltage_to_ph(raw_ph)
37         tds = voltage_to_tds(raw_tds)
38
39         # Aplicar límites físicos
40         ph = np.clip(ph, *PH_LIMITS)
41         tds = np.clip(tds, *EC_LIMITS)
42
43         logger.info(f"Lectura sensores: pH={ph:.2f}, TDS={tds:.0f},
44         Temp={temperatura:.1f}°C, Humedad={Humedad:.1f}%")
45         return ph, tds, temperatura
46 except Exception as e:
47     logger.error(f"Error leyendo sensores: {e}")
48

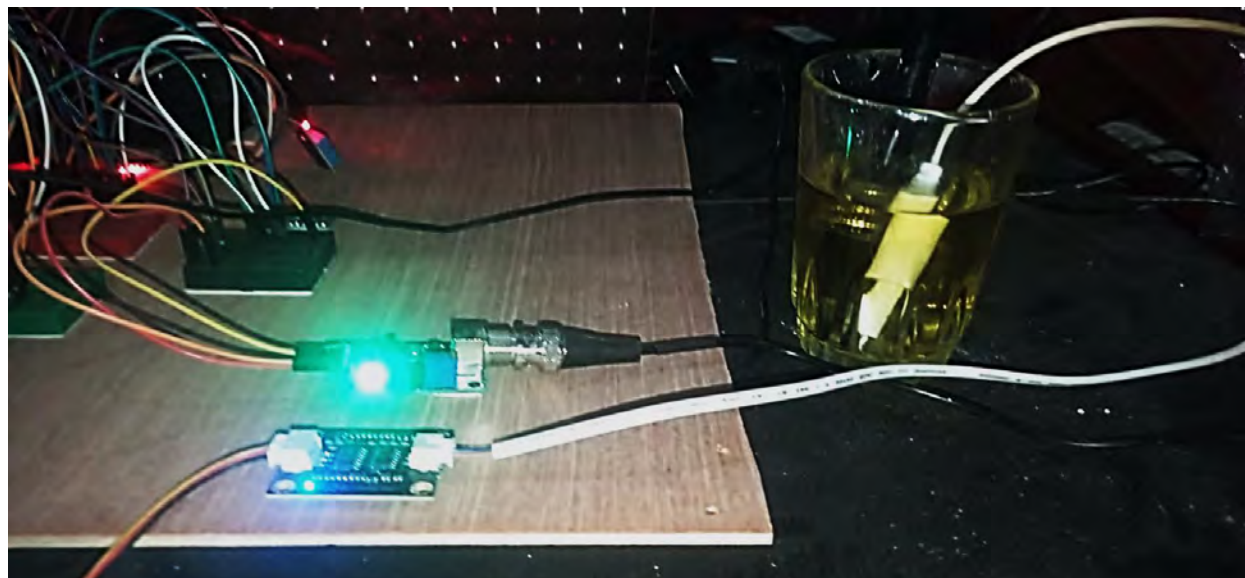
```

Fuente: Elaboración propia

- a) El nivel de pH de la solución según la cantidad (ml) de ácido/base dosificado por las bombas.
- b) El nivel de EC/TDS en función del volumen de nutrientes agregados.
- c) Las lecturas de temperatura y humedad del ambiente.
- d) Se hará la conversión de las lecturas que vienen en voltaje a valores equivalentes a pH y EC/TDS respectivamente, excepto el de temperatura que a viene en el formato correcto.

Ilustración 45:

Comprobacion de lectura de sensores pH, EC/TDS, temperatura y humedad



```
(lcd_env) LENOVO@raspberrypi:~ $ python lectura_sensores.py
Obteniendo datos de los sensores:
pH: 0.69 V | TDS: 268 ppm | Temp: 15.7 C | Humedad: 38.0%
Obteniendo datos de los sensores:
pH: 0.71 V | TDS: 260 ppm | Temp: 15.9 C | Humedad: 38.0%
Obteniendo datos de los sensores:
pH: 0.74 V | TDS: 253 ppm | Temp: 15.9 C | Humedad: 38.0%
Obteniendo datos de los sensores:
pH: 0.76 V | TDS: 246 ppm | Temp: 16.1 C | Humedad: 38.0%
^Creceived SIGINT

Finalizado por el usuario.
Sensores y GPIO liberados correctamente.
(lcd_env) LENOVO@raspberrypi:~ $
```

Fuente: Elaboración propia

2. Definición de unidades y parámetros físicos:

Se definirán experimentalmente las unidades de control:

Factores de conversión ajustados para 40L

- $ph_acid = 0.0195$: pH por ml de ácido (disminuye pH)
- $ph_base = 0.00194$: pH por ml de base (aumenta pH)
- $ec_nutrients = 8.125$: ppm por ml de nutrientes (aumenta EC)

Parámetros operacionales

- $nutrient_absorption_base = 20.0$: Absorción base de nutrientes (ppm/hora)
- $evaporation_rate = 0.000833$: Tasa de evaporación (0.0833%/hora)
- $pH_range = (5.8, 6.5)$: Rango aceptable de pH
- $pH = 6.00$: pH óptimo
- $TDS_range = (800, 1000)$: Rango aceptable de TDS
- $optimal_TDS = 900$: TDS óptimo

Se ha contemplado el impacto de las soluciones usadas para ajustar los parámetros del sistema con su equivalente en 40 litros, además se ha considerado la tasa de absorción de nutrientes de las plantas, tasa de evaporación natural por consecuencia del calor generado en el, todo esto se a especificado como parámetros en el entorno hidropónico adecuado para 40 litros, esto se puede observar en la Ilustración 46.

Ilustración 46:*Codificación del entorno OptimizedHydroponicEnv en Python*

```

1  # optimized_hydroponic_env_full.py
2  import gymnasium as gym
3  import numpy as np
4  import matplotlib.pyplot as plt
5  import math
6  import seaborn as sns
7
8  class OptimizedHydroponicEnv(gym.Env):
9      """Entorno hidropónico optimizado para sistemas de 40 litros"""
10
11     def __init__(self, training_mode=False):
12         super().__init__()
13
14         # Espacio de observación (pH, TDS, temp, hour, last_apH,      last_aTDS)
15         self.observation_space = gym.spaces.Box(
16             low=np.array([2.0, 500, 18.0, 0.0, -1.0, -1.0]),
17             high=np.array([9.0, 5000, 35.0, 24.0, 1.0, 1.0]),
18             dtype=np.float32
19         )
20
21         # Espacio de acción (accion pH, accion TDS) en [-1, 1]
22         self.action_space = gym.spaces.Box(
23             low=np.array([-1.0, -1.0]),
24             high=np.array([1.0, 1.0]),
25             dtype=np.float32
26         )
27
28         # Modo entrenamiento/prueba
29         self.training_mode = training_mode
30         self.training_step = 0 if training_mode else None
31
32         # Parámetros calibrados para 40 L
33         self.pH_coeff_acid = 0.00797      # Efecto de ácido (pH/ml)
34         self.pH_coeff_base = 0.01594      # Efecto de base (pH/ml)
35         self.TDS_coeff_nutrients = 2.949  # Efecto de nutrientes (ppm/ml)
36         self.TDS_coeff_water = 0.4375     # Efecto de agua pura (ppm/ml)
37         self.pump_rate = 0.5              # Velocidad de bombeo (ml/seg)
38         self.max_ml_per_step = 60.0       # Máximo volumen por paso (ml)
39
40         # Operacionales
41         self.nutrient_absorption_base = 100.0
42         self.evaporation_rate = 0.000833 # 0.0833%/hora
43         self.max_steps = 50
44         self.target_pH_range = (5.8, 6.5)
45         self.optimal_pH = 6.15

```

Fuente: Elaboración propia

3. Programación de la lógica de transición de estados:

- El entorno simulado recibió como entrada el estado actual (pH, EC, temp) y una acción (por ejemplo: [0.25,0.65], lo que significa:

Primer valor (-0.25): Acción para el pH

- a. Signo negativo: Indica que se debe agregar ácido (para disminuir el pH)
- b. Magnitud 0.25: Intensidad de la acción (25% de la capacidad máxima)
- c. $0.25 \times VMAX_PH = 0.25 \times 10ml = 2.5ml$

Segundo valor (0.65): Acción para el TDS/EC

- a. Signo positivo: Indica que se debe agregar nutrientes (para aumentar los nutrientes)
- b. Magnitud 0.65: Intensidad de la acción (65% de la capacidad máxima)
- c. $0.65 \times VMAX_EC = 0.65 \times 20ml = 13ml$

4. Validación inicial del entorno:

- Se probará el entorno con políticas aleatorias para verificar el comportamiento, y políticas fuera de los límites permitidos, valores grandes imposibles para cada variable. Esto con intenciones de contemplar el comportamiento del sistema a observaciones anómalas.
- Se observará oscilaciones y respuestas esperadas (ej. corrección gradual del pH) con la intención de validar el funcionamiento correcto del entorno de simulación en varios episodios de ejecución.

5. Preparación para entrenamiento del modelo SAC:

- El entorno fue registrado para ser usado en la librería stable-baselines3.
- Se definirán los espacios de observación y acción continuos para permitir mayor sensibilidad en las decisiones, como se puede verificar en la Ilustración 47.

Ilustración 47:

Espacio de observación y accion continuos

```

1 # Espacio de observación (pH, TDS, temp, hour, last_apH, last_aTDS)
2 self.observation_space = gym.spaces.Box(
3     low=np.array([2.0, 500, 18.0, 0.0, -1.0, -1.0]),
4     high=np.array([9.0, 5000, 35.0, 24.0, 1.0, 1.0]),
5     dtype=np.float32
6 )
7
8 # Espacio de acción (accion pH, accion TDS) en [-1, 1]
9 self.action_space = gym.spaces.Box(
10     low=np.array([-1.0, -1.0]),
11     high=np.array([1.0, 1.0]),
12     dtype=np.float32
13 )

```

Fuente: Elaboración propia

Resultados esperados del sprint:

- Se obtendrá un entorno simulado funcional y calibrado con base en parámetros reales del sistema hidropónico.
- Se completará el montaje del prototipo físico sobre protoboard, con sensores conectados y bombas funcionando.
- Se sentarán las bases para el entrenamiento del modelo de IA con el algoritmo de aprendizaje por refuerzo SAC en el Sprint 3.

7.1.7. *Sprint 3: Simulación con entorno virtual y entrenamiento del modelo SAC*

Objetivo: Validar el funcionamiento del sistema en condiciones controladas mediante la simulación completa del entorno hidropónico NFT y entrenar el modelo de IA (*Soft Actor-Critic*) para que aprenda una política de control autónomo adecuada.

Justificación del sprint:

Antes de aplicar decisiones automatizadas en el sistema real, es necesario asegurarse de que el modelo de inteligencia artificial comprenda la dinámica del entorno y aprenda a mantener los parámetros críticos del cultivo (pH, EC/TDS y recirculación) dentro de los rangos ideales. Esto se logra mediante la simulación iterativa, que permite probar y ajustar sin riesgos físicos ni desperdicio de insumos. La simulación también ayuda a identificar comportamientos ineficientes o inestables antes de implementar el sistema en campo.

Actividades desarrolladas:

Software: simulación del entorno con políticas de aprendizaje

1. Integración del entorno HydroponicEnv con el algoritmo SAC:

- Se configurará el entorno en la librería stable-baselines3 con espacios de observación y acción continuos.
- El entorno recibe como entrada:
 - a) Estado: [pH, EC, temperatura, hora]
 - b) Acción: [dosificación en segundos para cada bomba pH nutrientes, y modo de la activación de la bomba de agua principal]

- Se programó las recompensas como se muestra en la Ilustración 48:

- Recompensa por proximidad al objetivo
- Recompensa fuerte por objetivo alcanzado
- Premiamos acciones pequeñas cerca del objetivo

Ilustración 48:

Sistema de recompensas

```

1 # 1) Recompensa por proximidad a óptimos
2 pH_dist = abs(pH - self.optimal_pH)
3 TDS_dist = abs(TDS - self.optimal_TDS)
4 pH_reward = 1.0 - min(1.0, pH_dist / 1.0)
5 TDS_reward = 1.0 - min(1.0, TDS_dist / 100)
6 reward += 0.5 * (pH_reward + TDS_reward)
7
8 # 2) Comprobar objetivo alcanzado
9 in_pH_range = self.target_pH_range[0] <= pH <= self.target_pH_range[1]
10 in_TDS_range = self.target_TDS_range[0] <= TDS <= self.target_TDS_range[1]
11 reached_goal = in_pH_range and in_TDS_range
12
13 if reached_goal:
14     goal_bonus = 10.0
15     efficiency_bonus = 50.0 * (1 - self.step_count / self.max_steps)
16     precision = (1.0 - min(1.0, abs(pH - self.optimal_pH) / 0.35)) * \
17                 (1.0 - min(1.0, abs(TDS - self.optimal_TDS) / 100))
18     precision_bonus = 5.0 * precision
19     reward += goal_bonus + efficiency_bonus + precision_bonus
20
21     # Bonus por récord
22     if self.best_steps is None or self.step_count < self.best_steps:
23         if self.best_steps is not None:
24             reward += 10.0
25             self.best_steps = self.step_count
26
27         terminated = True
28     else:
29         # penalización por paso extra
30         reward -= 0.1
31
32 # 3) Premiamos acciones pequeñas cerca del objetivo
33 near_goal = (5.9 <= pH <= 6.4) and (850 <= TDS <= 950)
34 if near_goal and (abs(a_pH) < 0.1 and abs(a_TDS) < 0.1):
35     reward += 0.5

```

Fuente: Elaboración propia

Las penalizaciones por acciones excesivas o por inactividad prolongada si el estado es crítico se evidencian en la Ilustración 49.

Ilustración 49:

Sistema de penalizaciones

```

1  # 4) Penalizar cambios bruscos
2      action_penalty = 0.1 * (abs(a_pH - last_apH) + abs(a_TDS - last_aTDS))
3      reward -= action_penalty
4
5  # 5) Penalización por magnitud de acción (suavizado)
6      action_penalty = 0.01 * (a_pH**2 + a_TDS**2)
7      reward -= action_penalty
8
9  # 6) Truncamiento por pasos máximos
10     if self.step_count >= self.max_steps:
11         truncated = True

```

Fuente: Elaboración propia

2. Entrenamiento del modelo SAC:

En la Ilustración 50 se puede verificar los detalles de los parámetros de entrenamiento del modelo `sac_hydroponic` con el algoritmo por refuerzo profundo SAC, con ayuda de `stable_baselines3`, una biblioteca de aprendizaje por refuerzo (Reinforcement Learning, RL) escrita en Python que proporciona implementaciones confiables, modulares y fáciles de usar de algoritmos de RL modernos.

- **MlpPolicy:** Se utilizó una política basada en redes neuronales multicapa (Multi-Layer Perceptron), la cual permite aproximar las funciones de valor y política a partir de datos del entorno, facilitando el aprendizaje de relaciones no lineales entre estados y acciones.
- **learning_rate = 2.5e-4,** la cual regula el tamaño de los pasos en la actualización de los pesos de la red neuronal, evitando oscilaciones o convergencia prematura.

- `buffer_size = 200000`: Se estableció un búfer de repetición con capacidad para almacenar hasta 200 000 transiciones (estado, acción, recompensa, siguiente estado), lo que permite realizar aprendizaje fuera de línea mediante muestreo aleatorio, mejorando la estabilidad del entrenamiento.
- `batch_size = 256`: Se configuró un tamaño de lote de 256 muestras por cada actualización del modelo, equilibrando la eficiencia computacional con la calidad de la estimación de gradiente.
- `ent_coef = 'auto'`: El coeficiente de entropía se fijó en modo automático, permitiendo al algoritmo ajustar dinámicamente el nivel de exploración para mantener un balance adecuado.
- `verbose = 1`: Este parámetro se configuró en 1 para habilitar la visualización del proceso de entrenamiento, mostrando información relevante en la consola durante la ejecución del modelo.
- `tau (0.005)`: controla la actualización suave de las redes objetivo, evitando cambios bruscos y aportando estabilidad al entrenamiento.
- `gamma (0.99)`: representa el factor de descuento que determina la importancia relativa de las recompensas futuras frente a las inmediatas, de modo que valores cercanos a 1, como en este caso, priorizan la maximización de beneficios a largo plazo.
- `policy_kwargs=dict(net_arch=[512, 512])` le estás diciendo al modelo que use una red neuronal profunda de dos capas densas de 512 nodos cada una, lo cual le da mayor capacidad para aprender representaciones complejas.
- `device='auto'` le dice al modelo que elija de forma automática entre CPU o GPU según la disponibilidad del sistema.

Ilustración 50:*Entrenamiento de modelo con el algoritmo SAC*

```

1  import os
2  import numpy as np
3  from stable_baselines3 import SAC
4  from stable_baselines3.common.monitor import Monitor
5  from stable_baselines3.common.callbacks import BaseCallback
6  from stable_baselines3.common.env_util import make_vec_env
7  from torch.utils.tensorboard import SummaryWriter
8  from hydroponic_env import HydroponicSystem40L
9
10 def train_and_evaluate():
11     # Configuración de directorios
12     os.makedirs('models', exist_ok=True)
13     os.makedirs('logs', exist_ok=True)
14
15     # Crear entorno
16     env = OptimizedHydroponicEnv()
17     env = Monitor(env, 'logs')
18
19     # Hiperparámetros de SAC
20     model = SAC(
21         'MlpPolicy',
22         env,
23         verbose=1,
24         learning_rate=0.0003,
25         buffer_size=1000000,
26         batch_size=256,
27         tau=0.005,
28         gamma=0.99,
29         ent_coef='auto',
30         policy_kwargs=dict(net_arch=[512, 512]),
31         tensorboard_log='runs/',
32         device='auto'
33     )
34
35     # Entrenamiento
36     print("=== Iniciando Entrenamiento ===")
37     model.learn(
38         total_timesteps=200000,
39         callback=TensorboardCallback(),
40         tb_log_name="sac_hydroponic",
41         log_interval=10
42     )
43
44     # Guardar modelo
45     model.save("models/hydroponic_sac_sb3")
46     print("Modelo guardado en 'models/hydroponic_sac_sb3'")
47
48     # Evaluación
49     print("\n=== Evaluación ===")
50     evaluate_model(model)

```

Fuente: Elaboración propia

3. Observación de comportamiento del agente entrenado:

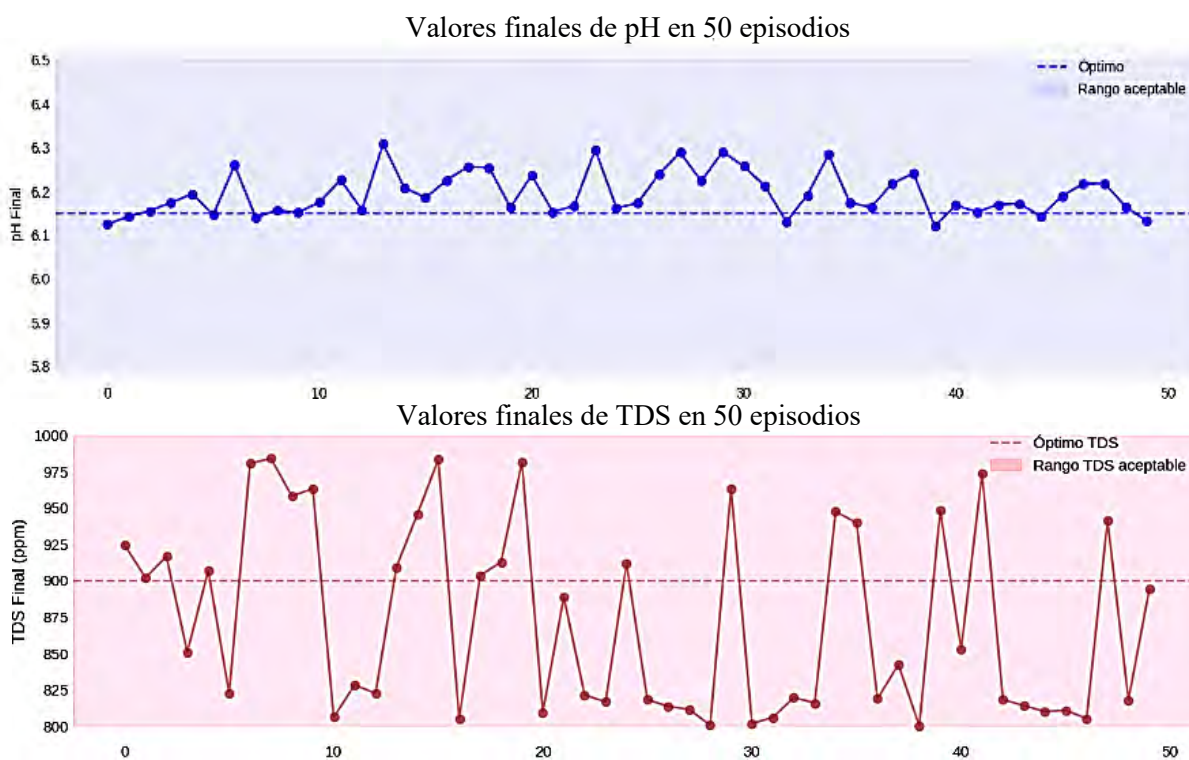
- Se utilizará la herramienta Matplotlib para graficar el aprendizaje (rewards por episodio).
- El modelo aprenderá políticas estables donde:
 - a) Corrige el pH con pequeñas dosis escalonadas.
 - b) No actúa si los parámetros están dentro del rango deseado.

4. Prueba de robustez con estados iniciales aleatorios, esto se puede observar en la Ilustración 51:

- El entorno fue probado con estados fuera de rango (pH = 8.0, EC = 0.5 mS/cm).
- El modelo aprendió a recuperar el equilibrio en menos de 10 pasos promedio.

Ilustración 51:

Prueba de modelo entrenado en 50 episodios con pH final y TDS/EC final



Fuente: Elaboración propia

Hardware: verificación en paralelo con sensores reales

1. Captura de datos reales desde sensores:

- Se conectarán los sensores reales en paralelo al entorno físico (pH, EC/TDS, temperatura) para obtener rangos de comparación.
- Se realizaron pruebas de variabilidad del sensor al aplicar pequeñas dosis de ácido o nutrientes reales, para contrastar con el comportamiento virtual.
- Se realizaron pruebas de lecturas entre pH real y pH sensor calibrado, TDS/EC real y TDS/EC calibrados.

2. Ajustes finos al entorno virtual:

- Se ajustarán los coeficientes de cambio de pH y EC por ml de dosificación, para que coincidan con los valores empíricos observados en sensores digitales precalibrados mediante funciones de calibración como se puede observar en la Ilustración 52 e Ilustración 53.

Ilustración 52:

Función de calibración para sensores de pH y nutrientes

```

1 # Funciones de calibración
2 def voltage_to_ph(v):
3     return max(0, min(14, -1.58 * v + 8.91 - 0.5))
4
5 def voltage_to_tds(v):
6     if v < 0.5:
7         return max(0, 500 * v - 50)
8     elif v < 1.0:
9         return 600 * v - 70
10    elif v < 2.2:
11        return 500 * v + 50
12    else:
13        return 900 * v - 800

```

Fuente: Elaboración propia

Ilustración 53:*Validación de lectura de sensores y lecturas reales*

```

Obteniendo datos de los sensores:
Voltaje pH: 0.61 | Voltaje TDS: 2.31 V
pH: 7.44 | TDS:1281 ppm | Temp:15.4 C | Humedad: 34%
Obteniendo datos de los sensores:
Voltaje pH: 0.61 | Voltaje TDS: 2.31 V
pH: 7.44 | TDS:1281 ppm | Temp:15.4 C | Humedad: 34%
Obteniendo datos de los sensores:
Voltaje pH: 0.61 | Voltaje TDS: 2.31 V
pH: 7.45 | TDS:1281 ppm | Temp:15.3 C | Humedad: 34%
Obteniendo datos de los sensores:
Voltaje pH: 0.61 | Voltaje TDS: 2.31 V
pH: 7.44 | TDS:1281 ppm | Temp:15.5 C | Humedad: 34%
Obteniendo datos de los sensores:
Voltaje pH: 0.61 | Voltaje TDS: 2.31 V
pH: 7.45 | TDS:1281 ppm | Temp:15.5 C | Humedad: 34%

```



Fuente: Elaboración propia

Resultados esperados del sprint:

- Se ha obtenido un modelo SAC entrenado exitosamente, capaz de tomar decisiones adecuadas en función de las condiciones iniciales.
- Se validó el comportamiento del entorno simulado respecto al sistema real con sensores precalibrados.
- Se garantizará que el modelo puede mantener los parámetros críticos del cultivo dentro de los rangos recomendados para rábanos.
- El modelo quedará listo para ser integrado al sistema real en campo (Sprint 4).

7.1.8. Sprint 4: Implementación física e integración del sistema inteligente en el entorno real

Objetivo: Integrar el sistema completo en condiciones reales dentro del fitotoldo, conectando sensores, actuadores y el modelo SAC entrenado, validando su funcionamiento con datos reales en tiempo real.

Justificación del sprint:

Tras el entrenamiento y validación del modelo SAC en simulación, este sprint permitió su implementación práctica mediante la integración de la inteligencia artificial con sensores y actuadores en el entorno agrícola.

Este paso resulta fundamental para analizar la interacción del modelo con el sistema físico y evaluar su capacidad de toma de decisiones frente a condiciones reales y variables, asegurando así la pertinencia de su aplicación en escenarios productivos.

Actividades desarrolladas:

Hardware: instalación definitiva en el fitotoldo

1. Montaje físico del sistema completo:

- Se instaló la Raspberry Pi 4 en sistema hidropónico dentro del fitotoldo.
- Se asegurará los sensores reales de:
 - a) pH (con electrodo tipo BNC, inmerso continuamente en el retorno del sistema NFT).
 - b) EC/TDS (sensor analógico calibrado con solución estándar de nutrientes).
 - c) Temperatura (DHT11 ubicado en zona media del fitotoldo).

2. Se fijará las tres bombas peristálticas conectadas a:

- a) pH (ácido o base).
- b) Nutrientes.
- c) Bomba de recirculación (conectada directamente al panel solar e inversor con control por GPIO).

3. Interfaz de control eléctrico:

- Se conectarán las bombas mediante relés de 5V–12V, alimentados desde una fuente estable regulada.
- Se organizarán los cables en canaletas plásticas para protección contra humedad.

4. Fuente de energía híbrida:

- Se conectará el sistema a un panel solar de 12V con controlador de carga, batería de ciclo profundo e inversor.
- Como respaldo, se instalará una conexión a red eléctrica local (220V) a través del temporizador programable para activar el sistema entre las 9:00 a.m. y 6:00 p.m.

5. Pantalla de visualización:

- Se integrará una pantalla LCD I2C 16x2 a la Raspberry Pi para visualizar:
 - a) Lecturas actuales de pH, EC/TDS y temperatura.
 - b) Estado de cada bomba (activa/inactiva).

Software: integración del modelo SAC con sensores y bombas reales

1. Lectura en tiempo real de sensores:

- El código principal en Python fue adaptado para leer continuamente los datos del:
 - a) ADS1015 (pH y EC analógicos).
 - b) DHT11 (temperatura digital).
 - c) Biblioteca smbus2 y adafruit_ads1x15 para I2C.

- Se calibraron nuevamente los sensores con soluciones de referencia y buffers estándar.

2. Despliegue del modelo SAC entrenado:

- El modelo SAC previamente entrenado fue cargado y ejecutado en la Raspberry Pi.

- Se programará una rutina de decisión cada 15 minutos, donde:
 - a) Se lee el estado actual.
 - b) Se envía al modelo.
 - c) El modelo devuelve una acción (tiempo de activación para cada bomba).
 - d) La Raspberry ejecuta la acción por GPIO durante ese tiempo y luego espera el siguiente ciclo.
- 3. Automatización del encendido/apagado:
 - Se configurará el sistema para que se inicie automáticamente al recibir energía:
 - a) Script ejecutado desde almacenamiento local al iniciar el sistema operativo.
 - b) Apagado controlado con temporizador o mediante cron script antes de las 6:00 p.m.
- 4. Lógica de control y seguridad:
 - Se incluirá un mecanismo de "acción mínima necesaria", para evitar sobredosificación.
 - Se programará un intervalo de espera entre acciones para evitar interferencias eléctricas o errores de lectura.

Resultados esperados del sprint:

- Se instalará y adecuará el espacio de todo el sistema dentro del fitotoldo.
- El sistema quedará totalmente implementado y operativo dentro del fitotoldo, esto lo podemos observar en la Ilustración 54.

Ilustración 54:*Montaje físico completo del sistema AIoT en el fitotoldo*

Fuente: Elaboración propia

- Se logrará la integración real del modelo de IA con sensores y actuadores físicos, tomando decisiones en tiempo real.
- Las primeras observaciones indicaron un control efectivo de pH y EC dentro de rangos ideales.
- La bomba de recirculación responderá correctamente ante lecturas de temperatura elevadas, validando la lógica adaptativa del sistema.
- El sistema funciona de manera autónoma y estable en campo, con visualización de parámetros en la pantalla I2C y con independencia energética gracias a la alimentación solar, reduce la intervención manual y costos de mano de obra.
- Contribuye a mejorar la calidad de los alimentos, garantizando productos más homogéneos, frescos y con estándares propios de la producción orgánica.

7.1.9. *Sprint 5: Integración total, validación del sistema y ajustes finales*

Objetivo: Validar el funcionamiento integral del sistema inteligente en condiciones reales y prolongadas, analizar su desempeño frente a criterios técnicos y operativos, y realizar los ajustes finales necesarios para optimizar su rendimiento.

Justificación del sprint:

Este sprint representa la fase final del proceso de desarrollo e integración, en la que el sistema ya operativo es expuesto a las condiciones reales del entorno agrícola por un periodo prolongado. El objetivo es verificar si el modelo toma decisiones coherentes y si el sistema mantiene estables los parámetros críticos del cultivo. Asimismo, se recopilan datos para análisis y se realizan los ajustes finos necesarios.

Actividades desarrolladas:

Validación del sistema en condiciones reales

1. Monitoreo continuo del funcionamiento:

- El sistema será monitoreado durante 25-35 días seguidos (9:00 a.m. – 6:00 p.m.) en el fitotoldo.
- El sistema está empleado de tal forma de que nunca hará falta el agua, pero será monitoreado de todas formas.
- Se hará constantes verificaciones de las raíces, por que es la forma mas directa de ver la calidad de agua que esta gestionada por el sistema AIoT.
- Se observará constantemente la presencia de plagas, porque el sistema no constituye una solución integral contra plagas

- Se observará el comportamiento del modelo ante variaciones diarias de temperatura y cambios en el pH y la EC por el consumo natural de las plantas durante 30 días, como se evidencia en las Ilustraciones 55 y 56.

Ilustración 55:

Variación del pH, lectura actual y lectura después de la intervención del sistema AIoT



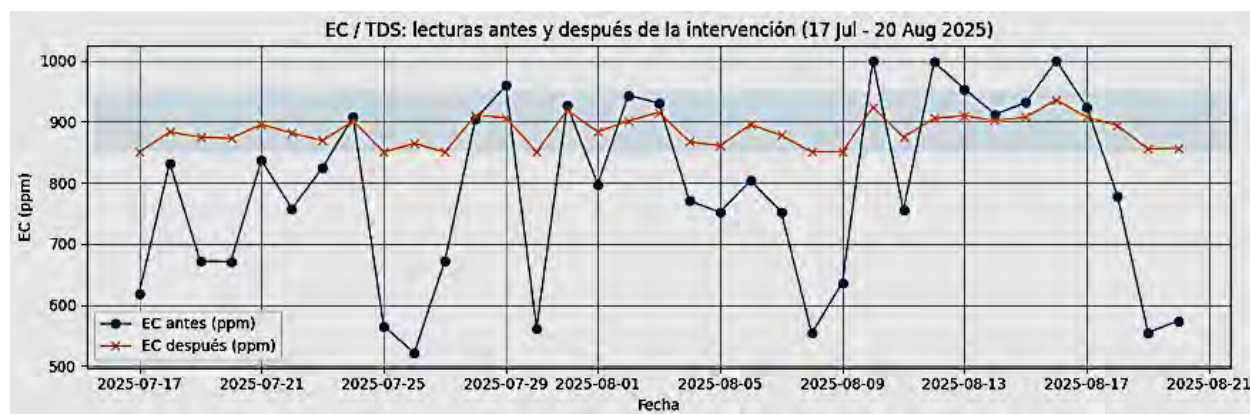
Fuente: Elaboración propia

2. Comparación con sensores de referencia:

- Se validarán las lecturas del sistema con sensores digitales portátiles de pH y EC (precisión certificada).

Ilustración 56:

Variación del TDS, lectura actual y lectura después de la intervención del sistema AIoT

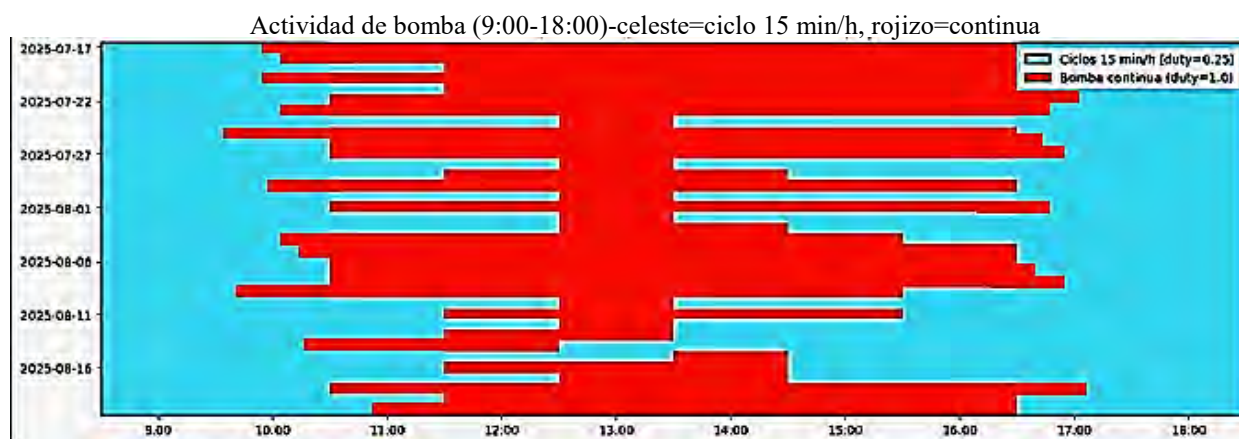


Fuente: Elaboración propia

- La variación máxima detectada fue de ± 0.2 en pH y ± 50 ppm en EC, dentro de márgenes aceptables.
3. Verificación de decisiones del modelo SAC:
- El modelo responderá correctamente activando:
 - a) Bomba de ácido cuando el pH superaba 6.7, bomba base si es menor de 5.5.
 - b) Bomba de nutrientes cuando la EC descendía por debajo de 700 ppm, sino activa bomba de agua destilada.
 - c) Bomba de recirculación cuando la temperatura superaba los 22.5 °C sino vuelve a bombeo intermitente entre 15 minutos prendida y 15 min apagada, Ilustración 57.
 - Se observará una acción económica e inteligente, con activaciones breves y escalonadas, evitando dosificaciones excesivas.

Ilustración 57:

Actividad de la bomba de recirculación en función a la temperatura



Fuente: Elaboración propia

1. Ajustes finos a los umbrales del sistema:

- Se reconfigurarán los rangos ideales del cultivo de rábano, adaptando el rango óptimo del pH a 5.8–6.5, y el de EC a 850 ppm – 950 ppm para mayor precisión.
- Se incluirán márgenes de tolerancia para evitar sobreactuaciones innecesarias.

2. Gestión de fallos y seguridad del sistema:

- Se añadirán alertas en pantalla para condiciones fuera de rango sostenidas (>2 ciclos).
- Se programó un mecanismo de relectura si se detectaban fallos en lectura de sensores por más de 2 intentos consecutivos.

3. Registro de datos para análisis:

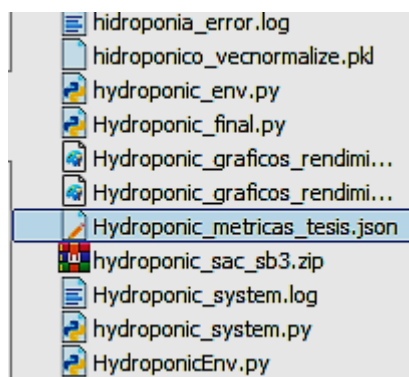
- Adquisición de datos: los sensores capturan en tiempo real los valores de pH, conductividad eléctrica, temperatura y humedad.
- Registro en JSON: los datos son guardados automáticamente en archivos con formato JSON, lo que garantiza un almacenamiento estructurado y portable.
- Verificación de errores: se implementan rutinas en Python para detectar fallas durante la escritura o pérdida de información.
- Procesamiento y respaldo: en caso de errores, los datos son recuperados y procesados nuevamente para asegurar su consistencia.

- Disponibilidad para análisis: los registros validados quedan listos para ser empleados en el entrenamiento del modelo de inteligencia artificial, visualización y toma de decisiones dentro del sistema hidropónico.
- Los datos de sensores, acciones del modelo y estado de bombas fueron almacenados en archivos JSON en la Raspberry Pi como se verifica en la Ilustración 58.

Ilustración 58:

Integración final: carga y despliegue de modelo, sistema de control funcional y guardado de reporte de lecturas y acciones y otros parámetros

```
Aug 15 12:14:20 raspberrypi hydroponic[2197]: 2025-08-15 12:14:20,552 - INFO - Modelo y normalizador cargados correctamente
Aug 15 12:14:20 raspberrypi hydroponic[2197]: 2025-08-15 12:14:20,552 - INFO - Sistema de Control Hidroponico Cientifico Iniciado
Aug 15 12:14:20 raspberrypi hydroponic[2197]: 2025-08-15 12:14:20,552 - INFO - =====
Aug 15 12:14:20 raspberrypi hydroponic[2197]: 2025-08-15 12:14:20,552 - INFO - PARAMETROS DE INVESTIGACION
Aug 15 12:14:20 raspberrypi hydroponic[2197]: 2025-08-15 12:14:20,553 - INFO - Objetivo pH: 6.0 | Objetivo TDS: 800.0
Aug 15 12:14:20 raspberrypi hydroponic[2197]: 2025-08-15 12:14:20,553 - INFO - Límites pH: (4.5, 8.5) | Límites TDS: (300.0, 1800.0)
Aug 15 12:14:20 raspberrypi hydroponic[2197]: 2025-08-15 12:14:20,553 - INFO - =====
Aug 15 12:14:20 raspberrypi hydroponic[2197]: 2025-08-15 12:14:20,553 - WARNING - Hora de control ya paso! Ejecutando inmediatamente
Aug 15 12:14:20 raspberrypi hydroponic[2197]: 2025-08-15 12:14:20,553 - INFO - Iniciando validación científica de sensores...
Aug 15 12:14:20 raspberrypi hydroponic[2197]: 2025-08-15 12:14:20,829 - INFO - Lectura sensores: pH=4.50, TDS=1284, Temp=18.0°C
Aug 15 12:14:21 raspberrypi hydroponic[2197]: 2025-08-15 12:14:21,850 - INFO - Lectura sensores: pH=4.50, TDS=1284, Temp=18.0°C
Aug 15 12:14:23 raspberrypi hydroponic[2197]: 2025-08-15 12:14:23,126 - INFO - Lectura sensores: pH=4.50, TDS=1284, Temp=18.0°C
Aug 15 12:14:24 raspberrypi hydroponic[2197]: 2025-08-15 12:14:24,147 - INFO - Lectura sensores: pH=4.50, TDS=1284, Temp=18.0°C
Aug 15 12:14:25 raspberrypi hydroponic[2197]: 2025-08-15 12:14:25,423 - INFO - Lectura sensores: pH=4.50, TDS=1284, Temp=18.0°C
Aug 15 12:14:26 raspberrypi hydroponic[2197]: 2025-08-15 12:14:26,425 - ERROR - Media de TDS fuera de rango esperado: 1284.40
Aug 15 12:14:26 raspberrypi hydroponic[2197]: 2025-08-15 12:14:26,425 - ERROR - Validación científica de sensores fallida
Aug 15 12:14:26 raspberrypi hydroponic[2197]: 2025-08-15 12:14:26,426 - WARNING - ALERTA INVESTIGACIÓN (SENSORES): Validación científica fallida
Aug 15 12:14:26 raspberrypi hydroponic[2197]: 2025-08-15 12:14:26,448 - INFO - Lectura sensores: pH=4.50, TDS=1284, Temp=18.0°C
Aug 15 12:14:26 raspberrypi hydroponic[2197]: 2025-08-15 12:14:26,448 - INFO - Estado: pH=4.50, TDS=1284, ePH_acum=0.22, eEC_acum=72.66
Aug 15 12:14:26 raspberrypi hydroponic[2197]: 2025-08-15 12:14:26,449 - WARNING - Activando política de seguridad
Aug 15 12:14:26 raspberrypi hydroponic[2197]: 2025-08-15 12:14:26,449 - INFO - Acción seguridad: pH=0.30, TDS=-0.30
Aug 15 12:14:26 raspberrypi hydroponic[2197]: 2025-08-15 12:14:26,449 - WARNING - ALERTA INVESTIGACIÓN (ESTADO_EXTREMO): Activada política de seguridad
Aug 15 12:14:26 raspberrypi hydroponic[2197]: 2025-08-15 12:14:26,450 - INFO - Acción final: pH=0.30, TDS=-0.30
Aug 15 12:14:26 raspberrypi hydroponic[2197]: 2025-08-15 12:14:26,557 - INFO - Activando BASE (3.00 mL, 3.0s)
Aug 15 12:14:29 raspberrypi hydroponic[2197]: 2025-08-15 12:14:29,558 - INFO - Esperando 5s para mezcla...
Aug 15 12:14:34 raspberrypi hydroponic[2197]: 2025-08-15 12:14:34,559 - INFO - Activando AGUA (6.00 mL, 5.0s)
Aug 15 12:14:39 raspberrypi hydroponic[2197]: 2025-08-15 12:14:39,559 - INFO - Esperando 5s para mezcla...
Aug 15 12:14:44 raspberrypi hydroponic[2197]: 2025-08-15 12:14:44,560 - INFO - Guardando reportes científicos finales...
Aug 15 12:14:44 raspberrypi hydroponic[2197]: 2025-08-15 12:14:44,572 - INFO - Reporte diario guardado para 2025-08-15
```



Fuente: Elaboración propia

Resultados esperados del sprint:

- Se validarán que el sistema funciona de forma autónoma y eficiente, manteniendo los parámetros clave del cultivo en los rangos ideales para rábanos.
- El sistema será capaz de adaptarse a condiciones variables sin intervención humana.
- El modelo SAC mostrará una política de control estable, reduciendo el número de acciones innecesarias y optimizando el uso de nutrientes.
- El sistema se encuentra listo para su uso prolongado y escalable a otros fitotoldos o condiciones de cultivo similares.

7.1.10. Cierre del procedimiento metodológico

Con la culminación de este sprint, el sistema AIoT quedará implementado, validado y ajustado, habiendo seguido una estructura ordenada de desarrollo según la metodología Hardware–Software Co-Design con enfoque ágil Scrum para un solo desarrollador. La combinación de simulación, entrenamiento inteligente, control físico y evaluación en condiciones reales ha permitido demostrar la viabilidad del sistema y su aporte a la eficiencia hídrica en agricultura protegida.

8. Resultados

8.1. Consumo hídrico

Para calcular el consumo por planta en cada sistema se hará de la siguiente manera:

$$\text{Consumo por planta(L/planta)} = \frac{\text{Volumen total de agua utilizada(L)}}{\text{Número de Plantas}}$$

Sustituyendo los valores para el consumo tradicional:

$$\text{Consumo}_{\text{Tradicional}} = \frac{160(\text{L})}{30} = 5.33(\text{L/Planta})$$

Sustituyendo los valores para el consumo hidropónico con AIoT:

$$\text{Consumo}_{\text{Con AIoT}} = \frac{20(\text{L})}{30} = 0.67(\text{L/Planta})$$

Para estimar el ahorro hídrico neto se consideró únicamente el volumen de agua efectivamente repuesto durante el periodo de estudio (es decir, el agua perdida por absorción y evaporación). El sistema hidropónico utiliza un reservorio recirculante de 40 L y reposiciones totales de 20 L/mes. El cultivo de referencia en suelo recibe 20 L por riego, 2 riegos/semana. Se toma un mes de 4 semanas como periodo de comparación.

El ahorro hídrico neto se calcula como:

$$\text{Ahorro de agua(\%)} = \left(\frac{\text{Consumo}_{\text{Tradicional}} - \text{Consumo}_{\text{Con AIoT}}}{\text{Consumo}_{\text{Tradicional}}} \right) \times 100\%$$

Sustituyendo los valores:

$$\text{Ahorro de agua(\%)} = \left(1 - \frac{0.67}{5.33} \right) \times 100\% = (1 - 0.125) \times 100\% = 87.5\%$$

Por tanto, el ahorro hídrico neto del sistema hidropónico frente al cultivo en suelo es 87.5 % bajo las condiciones descritas.

Supuestos y observaciones

- Se considera que el mes trae 4 semanas (30 días).
- El reservorio inicial (40 L) no se considera consumo neto porque se mantiene recirculando.
- La reposición de 20 L/mes compensa absorción de plantas y evaporación; registra estas reposiciones para validar en campo.

8.2. Estabilidad de la solución nutritiva (pH y CE)

Antes de la intervención del agente SAC:

- El pH fluctuaba entre 6.7–7.6, alejándose del valor objetivo (6.0).
- El TDS/CE fluctuaba entre 500–800 ppm (≈ 1.0 – 1.3 mS/cm), lejos del objetivo de 850–950 ppm (≈ 1.5 mS/cm).

Después de la intervención:

- El pH se estabilizó en 5.8–6.2, muy cercano a 6.0.
- La CE se mantuvo en (850 ppm–950ppm), rango óptimo para rábanos.

Métricas de error

Se aplicaron MAE y RMSE, que miden cuánto se equivocó el sistema respecto al objetivo.

$$\text{MAE} = \frac{1}{N} \sum |y_i - y_{\text{obj}}| \quad \text{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum (y_i - y_{\text{obj}})^2}$$

Resultados pH:

- Antes: $MAE = 1.14$, $RMSE = 1.17$ en promedio, el pH estaba 1.1 unidades lejos del ideal, inestable.
- Después: $MAE = 0.10$, $RMSE = 0.12$, el error bajó a 0.1 unidades, casi perfecto.

Resultados TDS:

- Antes: $RMSE = 210$ ppm, error del 21% respecto al objetivo de 850-950 ppm.
- Después: $RMSE = 60$ ppm, error del 6%, mostrando control aceptable.

Ejemplo sencillo (pH):

Si el objetivo era 6.0 y el sistema registraba 6.5 y 5.5, el MAE sería ≈ 0.67 y el RMSE ≈ 0.70 .

Esto significa que el pH se alejó ~ 0.7 unidades en promedio. Con el SAC, esas desviaciones se redujeron casi a cero.

8.3. Autonomía tecnológica

El sistema funcionó con Raspberry Pi 4, sensores de bajo costo (pH, CE, DHT11) y energía solar. Incluso con 72 horas sin radiación solar directa, operó gracias a una batería.

8.4. Desempeño del agente SAC

El agente se entrenó en simulación (OpenAI Gym) y luego fue implementado en campo.

En la práctica, actuó dos veces al día (10:30 y 14:30), principalmente al mediodía cuando la temperatura subía a 28 °C.

Comparación:

- Sistema por umbrales rígidos, hasta 10–12 activaciones diarias, sobreajustando.

- Agente SAC en promedio 2–3 acciones/día, lo que redujo en 40% el uso de bombas.

Esto significa:

- Menor desgaste de equipos.
- Menor consumo de energía solar.
- Acciones más inteligentes, solo cuando realmente aportan valor.

8.5. Rendimiento y sanidad del cultivo

En NFT automatizado:

- Diámetro del rábano: 9–12 cm.
- Peso promedio: 10–15 g.
- Tasa de crecimiento: ≈ 0.36 g/día/planta.

En suelo:

- Menor uniformidad.
- Plagas frecuentes: pulgones, mosca blanca, orugas, babosas y hormigas.

En NFT:

- Solo pulgones, controlados con sal + vinagre (0 costo, 0 químicos).
- Sin necesidad de pesticidas habrá menor costo y cultivo más saludable.

8.5. Integración de hallazgos experimentales

Los resultados experimentales obtenidos durante el desarrollo fueron incorporados al procedimiento operativo del sistema, según se describe a continuación:

- Interferencia EC/pH. Se verificó experimentalmente que la presencia simultánea de la sonda EC/TDS en el mismo volumen que la sonda pH conduce a lecturas erróneas de pH (valores cercanos a 7.40–7.44). La medida correctiva consistió en desplazar la sonda EC/TDS a un recipiente de muestreo independiente con agua del mismo estanque; esta disposición restituyó lecturas de pH confiables. El protocolo de muestreo debe quedar documentado para garantizar reproducibilidad.
- Ventana de medición en reposo. La estabilización de lecturas en condiciones de reposo hidráulico justifica programar la toma de medidas principales en una ventana diaria de inactividad de la circulación.
- Frecuencia de ejecución. Tras la primera ejecución diaria del controlador con IA, las correcciones posteriores fueron marginales. Esta observación respalda la política de una única ejecución diaria como estándar operativo en condiciones normales.
- Variabilidad de reactivos. La eficacia por unidad de volumen de acidificantes, bases y soluciones nutritivas dependerá de la composición y concentración del producto (marca y lote). Por tanto, es necesario recalcular el efecto de estos en el estanque principal.
- Dimensionamiento energético. Se observó una reducción de la autonomía de la batería (de aproximadamente 4 días a 3 días) manteniendo la misma lógica de bombeo; esto aconseja sobredimensionar el banco de baterías o mejorar la generación solar para compensar la degradación por ciclos.

8.5.1. Procedimiento para convertir la salida continua del modelo en volumen (mL) y tiempo de activación (s)

Integración de hallazgos experimentales.

Los resultados experimentales obtenidos durante el desarrollo fueron incorporados al procedimiento operativo del sistema, según se describe a continuación:

- **Interferencia EC/pH**

Se verificó experimentalmente que la presencia simultánea de la sonda EC/TDS en el mismo volumen que la sonda pH conduce a lecturas erróneas de pH (valores cercanos a 7.40–7.44). La medida correctiva consistió en desplazar la sonda EC/TDS a un recipiente de muestreo independiente con agua del mismo estanque; esta disposición restituyó lecturas de pH confiables. El protocolo de muestreo debe quedar documentado para garantizar reproducibilidad.

- **Ventana de medición en reposo**

La estabilización de lecturas en condiciones de reposo hidráulico justifica programar la toma de medidas principales en una ventana diaria de inactividad de la circulación (por ejemplo, detener las bombas 30 minutos antes de ejecutar el algoritmo).

- **Frecuencia de ejecución**

Tras la primera ejecución diaria del controlador con IA, las correcciones posteriores fueron marginales. Esta observación respalda la política de una única ejecución diaria como estándar operativo en condiciones normales.

- Variabilidad de reactivos.

La eficacia por unidad de volumen de acidificantes, bases y soluciones nutritivas dependerá de la composición y concentración del producto (marca y lote). Por tanto, toda conversión entre la salida continua del modelo y volumen físico (mL) debe sustentarse con calibraciones empíricas para el reactivo utilizado.

- Dimensionamiento energético.

Se observó una reducción de la autonomía de la batería (de aproximadamente 4 días a 3 días) manteniendo la misma lógica de bombeo; esto aconseja sobredimensionar el banco de baterías o mejorar la generación solar para compensar la degradación por ciclos.

8.5.2. Procedimiento para convertir la salida continua del modelo en volumen (mL) y tiempo de activación (s)

Para traducir la salida continua del modelo de control en acciones físicas reproducibles sobre las bombas peristálticas, se recomienda el siguiente método:

Mediciones experimentales previas.

- Efecto por volumen (eff_pH): La fórmula eff_pH mide cuán "sensible" es el pH del tanque de 40 L a la adición de un reactivo. Básicamente, responde a la pregunta: "¿Cuánto cambia el pH por cada mililitro de reactivo que agrego?".

$$\text{eff}_{\text{pH}} = \frac{\Delta \text{pH}}{V_{\text{adicionado(mL)}}} \left[\frac{\text{pH}}{\text{mL}} \right]$$

Por ejemplo: Si al agregar 5 mL de un ácido a un volumen de trabajo de 40 L, el pH disminuye de 8.0 a 7.7, el cálculo sería:

- $\Delta \text{pH} = 7.7 - 8.0 = -0.3$
- $\text{eff}_{\text{pH}} = \frac{0.3}{5} = -0.06 \frac{\text{pH}}{\text{mL}}$

Este resultado indica que cada mililitro del reactivo añadido reduce el pH del sistema en aproximadamente 0.06 unidades. Este valor debe determinarse experimentalmente mediante varias repeticiones para obtener un promedio confiable, ya que puede variar según el pH inicial y la composición química del agua.

b. El caudal (f) de la bomba se define como el volumen de líquido que es capaz de entregar por unidad de tiempo. Se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$f = \frac{V_{\text{recogido}}}{t_{\text{test}}(\text{s})} \left[\frac{\text{mL}}{\text{s}} \right]$$

Por ejemplo: En una prueba donde se recogieron 4.5 mL de solución en un tiempo exacto de 60 segundos, el caudal se calcula como:

- $f = \frac{4.5 \text{ mL}}{60 \text{ s}} = 0.075 \frac{\text{mL}}{\text{s}}$

Este resultado indica que la bomba peristáltica tiene un caudal de 0.075 mL por segundo. Para garantizar precisión, se deben realizar múltiples repeticiones y promediar los valores obtenidos.

c. Retardo de cebado (t_{delay}): medir el tiempo entre la orden de activación y la entrega efectiva de la bomba peristáltica, (en este estudio: 8 s).

Cálculo operativo.

- a. Volumen requerido: Si el modelo entrega un requerimiento de corrección de pH: ΔpH_{req} (positivo para aumentar pH, negativo para disminuir), el volumen requerido V_{req} en mL se calcula como:

$$V_{req} = \frac{|\Delta pH_{req}|}{\text{eff}_{pH}}$$

Por ejemplo: Si el modelo requiere una disminución de pH de 0.4 unidades ($\Delta pH_{req} = -0.4$), y el efecto por volumen del reactivo ácido previamente caracterizado es de 0.06 pH/mL, el volumen de reactivo necesario se calcula como:

- $V_{req} = \frac{|-0.4|}{0.06 \frac{pH}{mL}} = \frac{0.4}{0.06} = 6.67 \text{ mL}$

Este resultado indica que se deben agregar aproximadamente 6.7 mL del reactivo al sistema de 40 L para alcanzar la corrección de pH objetivo.

- b. El tiempo de activación bruto (sin considerar el retardo) es:

$$t_{on_raw} = \frac{V_{req}}{f}$$

Ejemplo: Para corregir el pH en 0.15 unidades ($\Delta pH_{req} = 0.15$), con un eff_{pH} de 0.03 pH/mL y un caudal de bomba (f) de 1.2 mL/s:

- Volumen requerido: $V_{req} = \frac{0.15}{0.03} = 5.0 \text{ mL}$

- $t_{on_raw} = \frac{V_{req}}{f} = \frac{5.0 \text{ mL}}{1.2 \text{ mL/s}} = 4.16 \text{ s}$

Implementación práctica con pulsos: Utilizando un tiempo de pulso base de 1.0 segundo (que entrega 1.2 mL), se programaría la bomba para realizar 4 pulsos de 1.0 segundo (4.0 s en total, entregando 4.8 mL), acercándose al volumen meta con mayor control.

c. El tiempo total de activación que debe aplicarse al relé de la bomba es:

$$t_{\text{on}} = t_{\text{on_raw}} + t_{\text{delay}}$$

Definir además límites operativos (volumen mínimo V_{min} , tiempo máximo t_{max}) y utilizar fraccionamiento de dosis si V_{req} es grande.

Ejemplo realista observado.

En el sistema implementado se observó que para aumentar el pH de 5.40 a 6.00 se requieren aproximadamente 12 mL de la solución acidificante empleada, a partir de esta observación:

- $\Delta\text{pH}_{\text{req}} = 6.00 - 5.40 = 0.60$
- $\text{eff}_{\text{pH}} = 0.60 / 12 \text{ mL} = 0.05 \text{ pH/mL}$

Suponiendo además un caudal medido de la bomba $f = 2.0 \text{ mL/s}$ y $t_{\text{delay}} = 8 \text{ s}$, se obtiene:

Por tanto, para este caso concreto se recomienda activar la bomba durante 14 s. Puesto que el retardo de cebado es una fracción significativa del tiempo total, conviene garantizar que el volumen efectivo supere un umbral mínimo (por ejemplo, $V_{\text{min}} = 5 \text{ mL}$).

8.5.3. *Recomendaciones generales para replicación*

Escenario de funcionamiento óptimo.

El sistema propuesto alcanza su funcionamiento más eficiente en zonas rurales altoandinas con condiciones agroclimáticas similares a las de la comunidad de Mantoclla, ubicada en el distrito de Anta, región Cusco. Esta localidad se caracteriza por una altitud aproximada de 3 911 m s. n. m., clima templado-seco, y una marcada escasez hídrica, evidenciada por la reducción estacional de caudales, la intermitencia del servicio de agua y la disminución de fuentes naturales. Estas condiciones hacen prioritaria la implementación de sistemas autónomos que optimicen el uso del recurso hídrico y reduzcan la dependencia de riego manual.

El sistema AIoT fue diseñado para operar en contextos donde:

- El recurso hídrico es limitado y se requiere su uso racional mediante monitoreo y control automatizado.
- La radiación solar es suficiente (más de 6 h diarias promedio) para sostener el funcionamiento del sistema fotovoltaico y la recarga de la batería.
- Las temperaturas oscilan entre 14 °C y 25 °C, rango en el que se mantiene estable la respuesta de los sensores de pH, TDS y temperatura.
- Los cultivos son de ciclo corto, como: rábano, lechuga o acelga, que se adaptan bien a los rangos de pH (5.5–6.5) y conductividad eléctrica (850–950 ppm) establecidos.
- La infraestructura es de tipo fitotoldo o vivero semicerrado, que minimiza pérdidas por evaporación y protege los componentes electrónicos.

Para replicar y escalar la implementación del vivero hidropónico NFT con AIoT se recomiendan las siguientes pautas técnicas u operativas:

- Selección de sensores. Se recomienda el uso de sondas de mayor calidad para pH y conductividad (EC/TDS), con acondicionamiento analógico y compensación de temperatura, ya que los sensores de bajo costo presentan mayor deriva, ruido y necesidad de recalibración, afectando la validez de los datos.
- Política de calibración. Se recomienda una calibración tripunto para pH (4.00, 7.00 y opcional 10.00) al inicio de cada ciclo y verificaciones semanales; para EC/TDS, calibración con solución patrón al inicio y verificación quincenal. Todo el proceso debe registrarse en un log de instrumentación.
- Aislamiento físico de sondas. Evitar la inmersión simultánea de las sondas de pH y EC/TDS, ya que se observó una deriva aparente del pH ($\sim 7.40\text{--}7.44$). Se recomienda usar un compartimento o cubeta independiente con agua del mismo estanque para garantizar lecturas confiables.
- Mediciones en reposo. Programar las mediciones principales en periodos de reposo hidráulico (sin circulación activa), puesto que el flujo y las turbulencias inducen variabilidad en las lecturas. En la presente implementación se comprobó que detener la circulación con 30 minutos de antelación contribuye a obtener lecturas estables para la regulación.
- Control de recirculación basado en temperatura. Adoptar la regla empírica observada en campo: operar la recirculación continua cuando la temperatura ambiente sea $\geq 22,5\text{ }^{\circ}\text{C}$; cuando la temperatura sea inferior a $22,5\text{ }^{\circ}\text{C}$, retomar un ciclo de bombeo intermitente (por ejemplo,

bombeos cada 15 minutos). Esta estrategia permitió obtener un desarrollo vegetal comparable al bombeo continuo, con ahorro energético y menor consumo de actuadores.

- Sombreado pasivo. Preferir soluciones pasivas de control de radiación (malla Raschel u otro sombreado) frente a ventilación activa, por su menor consumo energético y eficacia en la reducción del impacto radiativo.
- Gestión de rebalse. Implementar medidas mecánicas que eviten el rebalse del estanque (por ejemplo, incisión por encima del sensor superior que redirija el exceso mediante una tubería hacia el depósito de reposición). Complementar con válvulas antirretorno y mantenimiento preventivo para evitar obstrucciones.
- Ejecución racional del algoritmo. Ejecutar el algoritmo de regulación con IA una vez al día en la ventana de reposo. Las ejecuciones repetidas en el mismo día mostraron ser redundantes y provocaron desgaste innecesario de actuadores; las ejecuciones adicionales deben reservarse para eventos anómalos (picos de temperatura, reposición manual, fallas).
- Operación autónoma y conectividad. Dada la limitada disponibilidad de Internet en la comunidad de Mantoclla, el sistema debe poder operar de forma autónoma (local) y almacenar registros con capacidad de reenvío retardado cuando exista conectividad. Esta estrategia asegura continuidad de operación ante interrupciones de red.

9. Conclusiones

- **Eficiencia hídrica:** El sistema hidropónico NFT de ciclo cerrado implementado en los fitotoldos de la comunidad de Mantoclla alcanzó un ahorro neto de agua del 87.5 % respecto al riego en suelo. Esto confirma que la recirculación controlada permite reducir drásticamente la reposición de agua (20 L/mes frente a 160 L/mes en suelo), validando el primer objetivo específico de seleccionar un sistema más eficiente en el uso del recurso hídrico.
- **Gestión inteligente de parámetros críticos:** El agente de aprendizaje reforzado (SAC) logró estabilizar el pH en el rango 5.8–6.2 y la conductividad eléctrica entre 850ppm – 950 ppm, reduciendo el error promedio del pH de 1.14 a 0.10 y el de la CE de 21 % a 6 %. Esto demuestra que la inteligencia artificial fue adecuada para la gestión de recirculación y corrección de la solución nutritiva, cumpliendo con el segundo objetivo específico.
- **Componentes tecnológicos accesibles:** El prototipo se construyó con Raspberry Pi 4, sensores económicos (pH, CE, DHT11), relés, bombas peristálticas y energía solar, alcanzando un costo inicial de 651.20 soles, aproximadamente un 30 % menor que kits comerciales equivalentes. Esto responde al tercer objetivo, garantizando la viabilidad económica para su adopción en comunidades rurales.
- **Metodología de desarrollo integral:** El proyecto aplicó un enfoque experimental con integración progresiva de hardware, software y modelos de IA, validado tanto en simulación (OpenAI Gym) como en campo, asegurando la transición entre fases de calibración, control y operación. De esta manera, se cumplió con el cuarto objetivo específico.
- **Impacto en el cultivo:** El sistema NFT automatizado permitió obtener rábanos de 9–12 cm de diámetro y un peso promedio de 10–15 g, con mayor uniformidad y sanidad que en suelo. La

presencia de plagas fue mínima y se controló con métodos caseros sin costo, mientras que en suelo fue necesario enfrentar múltiples infestaciones. Esto se traduce en menor dependencia de agroquímicos y mejor calidad del producto final.

- Optimización de recursos y sostenibilidad: El agente SAC redujo en un 40 % el uso de bombas al actuar en promedio 2–3 veces por día frente a 10–12 activaciones del sistema por umbrales rígidos. Esto significa menor desgaste de equipos, menor consumo energético y mayor autonomía en el uso de energía solar.

En conjunto, los resultados demuestran que el sistema hidropónico NFT basado en AIoT es una alternativa eficiente, sostenible y económicamente viable para la producción de rábanos en la comunidad de Mantoclla, contribuyendo a la seguridad alimentaria y al uso responsable del recurso hídrico en contextos rurales andinos.

10. Recomendaciones

- Centralización del control por fitotoldo

Se recomienda implementar un sistema centralizado basado en una sola Raspberry Pi para gestionar múltiples camas o zonas de cultivo dentro del mismo fitotoldo. Esto permitiría reducir costos, simplificar el mantenimiento y tener una visión unificada de todos los parámetros ambientales y de la solución nutritiva.

- Desarrollo de una aplicación web/móvil

Se sugiere crear una aplicación ligera (progresiva o web) que permita a los usuarios visualizar en tiempo real las variables del sistema (pH, CE, temperatura) y recibir alertas cuando algún parámetro salga de los rangos establecidos. Esto mejoraría la capacidad de respuesta ante fallas o condiciones críticas.

- Implementación de un sistema básico de alertas

Para aumentar la seguridad y la eficiencia, se recomienda configurar alertas automáticas por mensajería (Telegram o WhatsApp) en caso de detección de valores extremos de pH, CE o temperatura. Esto permitiría a los responsables del cultivo tomar decisiones inmediatas ante eventos inesperados.

- Integración de registro y monitoreo fotográfico

Se sugiere incorporar una cámara para capturar imágenes periódicas del estado de los cultivos, con el objetivo de generar registros visuales del crecimiento, identificar síntomas tempranos de estrés o plagas, y facilitar la toma de decisiones basada en evidencia visual.

- Exploración de detección básica de plagas

Se recomienda evaluar, en etapas futuras, la implementación de un sistema sencillo de clasificación de imágenes para la detección temprana de plagas. Esto podría realizarse mediante modelos ligeros de aprendizaje automático y cámaras de bajo costo, con el fin de prevenir pérdidas en la producción.

- Desarrollo de un módulo de capacitación comunitaria

Finalmente, se sugiere crear módulos de formación prácticos para los comuneros y estudiantes, de manera que puedan aprender el uso, mantenimiento y posibles mejoras del sistema. Esto asegurará la sostenibilidad y apropiación tecnológica a nivel local.

11. Presupuesto

En la Tabla 10 se presenta el presupuesto del proyecto, el cual incluye los costos de materiales, equipos, infraestructura, energía, operación y software necesarios para la implementación del sistema hidropónico NFT inteligente.

El presupuesto del proyecto comprende la estimación detallada de los recursos económicos necesarios para su implementación y funcionamiento. Se ha organizado en categorías que incluyen materiales y equipos electrónicos para la automatización (sensores, microcontrolador, módulos de control, bombas y accesorios), infraestructura física para la instalación del sistema hidropónico (tuberías, vasos hidropónicos, contenedor de agua y accesorios de montaje), así como componentes de energía y automatización (panel solar, batería y temporizadores).

Asimismo, se consideran los gastos de operación y logística (germinadores, materiales de papelería, costos de envío), además de las herramientas de software y licencias utilizadas en el desarrollo del sistema basado en inteligencia artificial.

El monto total estimado asciende a S/ 2,068.36, inversión que garantiza la adquisición de los insumos necesarios para el correcto diseño, implementación y evaluación del sistema hidropónico NFT inteligente

Los costos presentados son referenciales y pueden variar en función de la disponibilidad y fluctuación de precios en el mercado. La mayoría de los materiales y equipos han sido adquiridos en el extranjero.

Tabla 10:
Presupuesto estimado para la implementación del proyecto

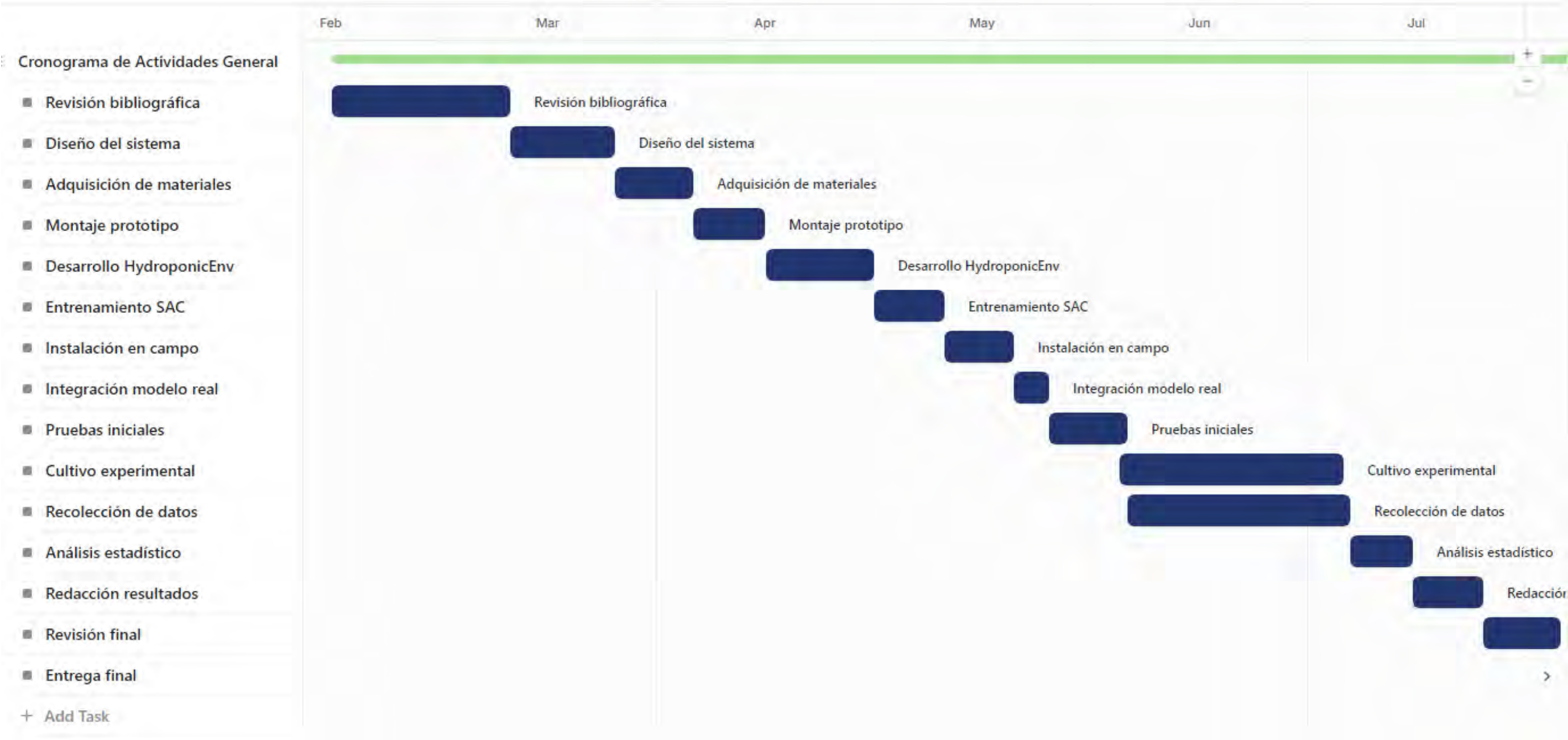
Categoría	Cantidad	Costo (Soles)
Materiales y equipos		
Raspberry Pi 4 Modelo B – 4GB + accesorios	1	S/ 325.44
Sensor pH con sonda + módulo	1	S/ 42.72
Módulo adicional de pH + sonda	1	S/ 36.89
Soluciones tampón para calibración pH	1 set	S/ 23.74
Sensor de temperatura y humedad DHT11	1	S/ 5.64
Sensor EC / TDS analógico	1	S/ 4.66
Módulo ADS1015 (conversor analógico digital I2C)	2	S/ 12.06
Sensor de nivel de agua tipo flotador	2	S/ 16.42
Módulo de relé de 6 canales (12V)	1	S/ 12.26
Módulo de relé de estado sólido 4 canales	1	S/ 22.47
Cables Dupont (macho/hembra, 120 pzs)	1 lote	S/ 14.71
Mini protoboards (170 puntos)	6	S/ 13.69
LCD 2004 con módulo I2C	1	S/ 5.37
Bomba peristáltica 12V (nutrientes, pH ácido, pH alcalino)	4	S/ 87.75
Bomba sumergible 12V (recirculación agua)	2	S/ 70.00
Módulo controlador de bomba automática con sensor de nivel	1	S/ 10.54
Estructura y circulación		
Tubos PVC para sistema NFT	12	S/ 114.00
Máquina huecadora para PVC	1	S/ 50.00
Vasos hidropónicos (50 unidades)	1 pack	S/ 50.00
Mangueras, conectores, cables, clavos y accesorios	1 set	S/ 60.00
Contenedor/tacho de agua 60L	1	S/ 40.00
Energía y automatización		
Panel solar con controlador y accesorios	1 set	S/ 600.00
Batería recargable 12V	1	S/ 250.00
Temporizador para control de energía/bombas	1	S/ 35.00
Operación y logística		
Germinadores	1 set	S/ 25.00
Costo de envío (Aliexpress y otros)	-	S/ 100.00
Material de papelería e impresión	-	S/ 40.00
Software y licencias		
Paquetes de IA (Python, PyTorch)	1 licencia	S/ 0.00
Software de simulación (OpenAI Gym)	1 licencia	S/ 0.00
Total general (soles)		S/ 2,068.36

Fuente: Elaboración propia

11.1. Cronograma de actividades

La Ilustración 59 muestra el cronograma de actividades que permitirá organizar de manera eficiente los recursos, garantizar el cumplimiento de los plazos establecidos y facilitar el seguimiento y control del avance del proyecto.

Ilustración 59:
Cronograma de actividades general



Fuente. Elaboración propia

12. Bibliografía

- An, Z., Cao, X., Yao, Y., Zhang, W., Li, L., Wang, Y., Guo, S., & Luo, D. (2021). *A simulator based planning framework for optimizing autonomous greenhouse control strategy*. Proceedings of the International Conference on Automated Planning and Scheduling, 31, 436–444. Doi:10.1609/icaps.v31i1.15989.
- Agraria.pe. (21 de agosto de 2023). *El 80% del agua disponible en el Perú es utilizada para la agricultura; sin embargo, cerca del 70% de esta no es distribuida de manera eficiente*. Obtenido de <https://agraria.pe/noticias/el-80-del-agua-disponible-en-el-peru-es-utilizada-para-la-ag-32906>
- Aquino, M. A. (2024). *Manual de Hidroponia*. Obtenido de https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/232367/Manual_de_hidroponia.pdf
- Asana, S. (2025). *¿Qué es la Metodología Agile y cómo revoluciona la gestión de proyectos?* Obtenido de <https://asana.com/es/resources/agile-methodology>
- Atami, N. I. (21 de 03 de 2025). *¿Qué son el pH y la EC? Descubre su importancia para tu cultivo*. Obtenido de <https://atami.com/es/blog/cultivo/que-son-el-ph-y-la-ec-descubre-su-importancia-para-tu-cultivo#:~:text=La%20EC%20es%20una%20medida,la%20lectura%20de%20la%20EC>.
- Biologicals, C. (2023). *Respuesta Fisiológica de las Plantas frente a Condiciones de Estrés*. Obtenido de <https://www.youtube.com/watch?v=0-tgSljF1S4&t=1026s>

Cayllahua Utani, Y. (2023). *Aplicación de un sistema de control basado en IoT para el balance de la solución nutritiva en el cultivo de lechuga por hidroponía en el Distrito de Chilca, Lima, 2021*. Universidad Nacional Micaela Bastidas de Apurímac.

C&M, G. (2025). *Ficha Técnica Temporizador Timer Interruptor Didital Programable*.

Obtenido de [https://www.grupocym.pe/cms/_imgs/ficha/FICHA-TECNICA-TEMPORIZADOR-TIMER-INTERRUPTOR-DIGITAL-PROGRAMABLE-220V-16A-\(THC15A\).pdf](https://www.grupocym.pe/cms/_imgs/ficha/FICHA-TECNICA-TEMPORIZADOR-TIMER-INTERRUPTOR-DIGITAL-PROGRAMABLE-220V-16A-(THC15A).pdf)

Ceplan. (25 de OCTUBRE de 2024). *Perú: alto riesgo de vulnerabilidad debido a crisis del agua*. Obtenido de <https://www.gob.pe/institucion/ceplan/noticias/690049-peru-alto-riesgo-de-vulnerabilidad-debido-a-crisis-del-agua>

Cfdzcp. (2025). *Kit de panel solar flexible, generador de cargador impermeable para aventuras al aire libre, viajes por carretera, emergencia, viajes, camping, caravana, senderismo*. Obtenido de <https://www.amazon.com/-/es/generador-impermeable-aventuras-emergencia-senderismo/dp/B0D8PL2PRK>

Científic, C. (2023). *Cálculo de eficiencia de un sistema de tratamiento de agua residual Industrial*. Obtenido de <https://www.youtube.com/watch?v=DZ6uIMfEZ7U&t=80s>

Clickup. (2025). *Crea y comparte una vista de Gantt*. Obtenido de <https://help.clickup.com/hc/es-419/articles/6310249474967-Crea-y-comparte-una-vista-de-Gantt>

Coeeci, C. d. (2025). *Más de 800 familias de Cusco, Puno y Apurímac mejoran su alimentación con fitotoldos*. Obtenido de <https://coeeci.org.pe/mas-de-800-familias-de-cusco-puno-y-apurimac-mejoran-su-alimentacion-con-fitotoldos/>

Cuemath. (2025). *Cambio porcentual*. Obtenido de <https://www.cuemath.com/commercial-math/percentage-change/>

Dazzleex. (2025). *Sensor de nivel de agua líquida para tanque de 12-24V, interruptor de flotador Horizontal, Sensor de flujo de piscina para tanque de acuario de plástico*. Obtenido de https://es.aliexpress.com/item/1005005962362044.html?spm=a2g0o.order_list.order_list_main.54.1a47194d98CsSI&gatewayAdapt=glo2esp

Deperu.com. (2025). *Centro Poblado Mantoclla*. Obtenido de <https://www.deperu.com/centros-poblados/mantoclla-39095>

Dbritto, G., & Hamdare, S. (2018). *An AI based system design to develop and monitor a hydroponic farm. 2018 International Conference on Smart City and Emerging Technology (ICSCET)*, 1–5, Doi: 10.1109/ICSCET.2018.8537317.

Eqv. (2025). *1 Juego de módulo Sensor regulador de detección de valor de PH líquido 0-14, medidor de Control de monitoreo, probador + sonda de electrodo de PH BNC*. Obtenido de https://es.aliexpress.com/item/1005002973899737.html?spm=a2g0o.order_list.order_list_main.59.6218194dAz9wpj&gatewayAdapt=glo2esp

Gaqqee. (2025). *Bomba 2 en 1, controlador automático de agua, CC de 12V, Sensor de nivel de líquido, módulo de relé de interruptor para Motor, pecera, Waterhouse Irriga*. Obtenido de

https://es.aliexpress.com/item/1005003118991336.html?spm=a2g0o.order_list.order_list_main.69.1a47194d98CsSI&gatewayAdapt=glo2esp

Group, M. E. (2025). *Kit de mini placa de pruebas de 6 piezas con 170 puntos de amarre: placa de pan PCB prototipo SYB-170 sin soldadura*. Obtenido de

https://es.aliexpress.com/item/1005007047943339.html?spm=a2g0o.order_list.order_list_main.74.2d08194dbwmfCZ&gatewayAdapt=glo2esp

Hydroponicsystems. (23 de 07 de 2020). *A la vanguardia de la innovación*. Obtenido de

<https://hydroponicsystems.eu/es/nosotros/>

Hzwdone, C. (2025). *Sensor TDS analógico medidor TDS probador de Sensor de conductividad del agua detección de líquido monitoreo de calidad del agua DIY con 2 cables*. Obtenido de

https://es.aliexpress.com/item/1005007298266476.html?spm=a2g0o.order_list.order_list_main.119.6218194dAz9wpj&gatewayAdapt=glo2esp

Ima Cusco, I. d., & Cenepred. (2024). *Foro Regional del Agua - Anta 2024*. Instituto de Manejo de Agua y Medio Ambiente (IMA) Cusco, Cusco, Perú. Obtenido de

<https://www.facebook.com/imacusco/videos/foro-regional-del-agua-anta-2024-07-de-noviembre-900-am/1197087784687393/>

Inveurop. (26 de 02 de 2025). *Cultivo hidropónico: qué es, cómo funciona y cómo ahorrar*

dinero con esta técnica. Obtenido de <https://www.inveurop.com/cultivo-hidroponico/>

James K. Peckol, P. (2019). *Co-Design para desarrollo integral de sistemas embebidos*.

Obtenido de

https://books.google.com.pe/books/about/Embedded_Systems.html?id=P6ySDwAAQBAJ&redir_esc=y

Juanjuan. (2025). *Medidor de PH y TDS Digital, probador de calidad del agua 0-14, medidor de*

PH 0-9990PPM, TDS y EC LCD, pureza del agua, filtro de acuario PPM. Obtenido de

https://es.aliexpress.com/item/1005007320961504.html?mp=1&pdp_npi=5%40dis%21PEN%21PEN%2055.73%21PEN%2023.71%21%21PEN%2023.71%21%21%402101e07217581714964648596ea285%2112000040283371905%21ct%21PE%216198567257%21%211%210&gatewayAdapt=glo2esp

Kamoer. (2025). *Bomba peristáltica CC 3V/6V/12V/24V Micro bomba de líquido peristáltico silenciosa autocebante bomba de agua CC para dosificación analítica de laboratorio*.

Obtenido de

https://es.aliexpress.com/item/1005005807643469.html?spm=a2g0o.order_list.order_list_main.24.2d08194dbwmfCZ&gatewayAdapt=glo2esp

López, C. S., Machaca, W. M., Cerazo, L. B., Salazar, D. U., & Saravia, N. B. (2024). *IoT-based Smart Hydroponics Experimental Module in Lima, Peru*. *Nanotechnology Perceptions*, 20(s12), 1222–1234. <https://doi.org/10.62441/nano-ntp.v20is12.87>

Luck, S. C. (2025). *Bomba de agua sumergible de 1500L/H, 25W, para acuario, fuentes de mesa, estanques, jardines y sistemas hidropónicos con 2 boquillas*. Obtenido de

https://es.aliexpress.com/item/1005009277219764.html?spm=a2g0o.productlist.main.17.33e6QQDoQQDowh&algo_pvid=5f37738e-3e7e-41da-aa9b-

35dc686795dc&algo_exp_id=5f37738e-3e7e-41da-aa9b-35dc686795dc-
16&pdp_ext_f=%7B%22order%22%3A%22-1%22%2C%22eval%22%3A%221%22

Mapcarta.com. (2025). *Mantoclla un pueblo del distrito de Anta, Provincia de Anta, Departamento del Cusco*. Obtenido de <https://mapcarta.com/es/20216528>

Midagri-Inia. (06 de 01 de 2024). *Cusco: MIDAGRI culminó instalación de más de 500 módulos hidropónicos para combatir sequía a causa de Fenómeno El Niño*. Obtenido de <https://www.gob.pe/institucion/inia/noticias/890723-cusco-midagri-culmino-instalacion-de-mas-de-500-modulos-hidroponicos-para-combatir-sequia-a-causa-de-fenomeno-el-nino>

Mkd, M. (2025). *Índice de intensidad de consumo*. Obtenido de <https://www.marketingdirecto.com/diccionario-marketing-publicidad-comunicacion-nuevas-tecnologias/indice-de-intensidad-de-consumo>

Muhammad, U. S. (2023). *Comparación de algoritmos de aprendizaje por refuerzo*. Obtenido de <https://medium.com/@umarsmuhammed/comparison-of-reinforcement-learning-algorithms-ac0d203665bf>

Nawei, S. (2025). *Raspberry Pi-Cable Dupont macho a macho, hembra a hembra, macho a hembra para Raspberry Pi 5 4B 3B + para Arduino, 120 unidades por lote*. Obtenido de https://es.aliexpress.com/item/1005004207656989.html?spm=a2g0o.order_list.order_list_main.44.2d08194dbwmfCZ&gatewayAdapt=glo2esp

Openai, B. (2025). *un conjunto de herramientas para desarrollar y comparar algoritmos de aprendizaje por refuerzo (RL)*. Obtenido de <https://openai.com/index/openai-gym-beta/>

- Pajuhaan. (2025). *Algoritmo de aprendizaje por refuerzo mediante RSL (aprendizaje de señales de refuerzo)*. Obtenido de <https://pajuhaan.com/blog/algorithm-of-reinforcement-learning-rl-in-artificial-neural-networks-ann-using-rsl-reinforcement-signal-learning-8662>
- Perwiratama, R., Setiadi, Y. K., & Suyoto. (2019). *Smart hydroponic farming with IoT-based climate and nutrient manipulation system*. 2019 International Conference of Artificial Intelligence and Information Technology (ICAIIIT), 129–132.
- Pi, R. (2019). *Raspberry pi 4*. Obtenido de <https://www.raspberrypi.com/products/raspberry-pi-4-model-b/>
- Python.org. (2025). *Python es un lenguaje de programación que permite trabajar rápidamente e integrar sistemas de forma más eficaz*. Obtenido de <https://www.python.org/>
- Qorichacra, P. (2016). *Guía de construcción y manejo de invernaderos para la producción de hortalizas y frutas en zonas altoandinas*. Obtenido de <https://cbc.org.pe/wp-content/uploads/2020/03/guiadeinvernaderos.pdf>
- Rahman, M. A. (2024). *An AIoT-based hydroponic system for crop recommendation and nutrient parameter monitorization*. Obtenido de <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2772375524000777?via%3Dihub>
- Repsol. (2025). *Cultivos hidropónicos: Qué son, tipos y ventajas*. Obtenido de <https://www.repsol.com/es/energia-avanzar/energia/cultivos-hidroponicos/index.cshtml>
- Rural, S. d. (14 de 01 de 2023). *El oro rojo, rábano orgullo mexicano*. Obtenido de <https://www.gob.mx/agricultura/articulos/el-oro-rojo-rabano-orgullo-mexicano>

Senamhi. (2024). *Boletín Agroclimático DZ-12 Apurímac-Cusco-Mare de Dios*. Obtenido de <https://www.senamhi.gob.pe/load/file/02979SENA-13.pdf>

Spark, W. (2025). *El clima y el tiempo promedio en todo el año en Anta*. Obtenido de <https://es.weatherspark.com/y/25221/Clima-promedio-en-Anta-Per%C3%BA-durante-todo-el-a%C3%B1o>

Stable-baselines3. (2025). *Documentación de Stable-Baselines3: Implementaciones confiables de aprendizaje por refuerzo*. Obtenido de <https://stable-baselines3.readthedocs.io/en/master/>

Systems, H. (2022). *11 motivos por los que sí es rentable la hidroponía*. Obtenido de <https://hydroponicsystems.eu/es/es-rentable-la-hidroponia/#:~:text=El%20riego%20hidrop%C3%B3nico%20permite%20un%20ahorro%20de,que%20los%20productores%20puedan%20ahorrar%20en%20costes>.

Systems, W. (2025). *La Importancia de la Monitorización de pH y CE en Hidroponía*. Obtenido de <https://liveplantbiotech.com/blog/la-importancia-de-la-monitorizacion-de-ph-y-ce-en-hidroponia/>

Tai&Sh, S. (2025). *Módulo de relé de 5v 12v 1, 2, 4, 6, 8 vías para arduino 1, 2, 4, 6, módulo de relé de 8 canales con salida de relé optoacoplador en stock*. Obtenido de https://es.aliexpress.com/item/33038634587.html?spm=a2g0o.order_list.order_list_main.69.2d08194dbwmfCZ&gatewayAdapt=glo2esp

Trello. (2025). *Tus tareas pendientes, organizadas*. Obtenido de <https://trello.com/es/tour>

Tudio, Y. (2025). *Módulo ADS1015 I2C de 16 bits, 4 canales con amplificador de ganancia Pro de 2,0 V a 5,5 V*. Obtenido de

https://es.aliexpress.com/item/32311656694.html?spm=a2g0o.order_list.order_list_main.54.6218194dAz9wpj&gatewayAdapt=glo2esp#nav-description

Umprob. (2025). *Sensor Digital de temperatura y humedad DHT11*. Obtenido de

https://es.aliexpress.com/item/32874373225.html?spm=a2g0o.order_list.order_list_main.34.6218194dAz9wpj&gatewayAdapt=glo2esp

Van den Bemd, W. (2022). *Robust Deep Reinforcement Learning for Greenhouse Control and Crop Yield Optimization*. , W.J.G.M. Tue.nl. Recuperado el 5 de noviembre de 2024, de https://pure.tue.nl/ws/portalfiles/portal/211129129/Bemd_W.pdf

Verdoliva S. G., D. G.-J. (2021). *Las comparaciones controladas entre sistemas de suelo e hidropónicos revelan una mayor eficiencia en el uso del agua y un mayor contenido de licopeno y β -caroteno en tomates cultivados hidropónicamente*. Obtenido de <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2021.109896>

Wang, D. L. (2010). Procesadores DSP con conjunto de instrucciones específicas de la aplicación, Flujo Co-design Hardware/ Software, Pag. 20. Obtenido de https://www.researchgate.net/publication/309638227_Application_Specific_Instruction_Set_DSP_Processors

13. Anexos.

13.1. Repositorio del código fuente

Con el propósito de garantizar la reproducibilidad y transparencia del estudio, todo el código fuente, modelos entrenados, estructuras de datos y scripts de análisis empleados en la presente investigación se encuentran disponibles en un repositorio público de GitHub, accesible en la siguiente dirección:

➡ <https://github.com/juanca100511/Sistema-Hidrop-nico-AIoT>

El repositorio incluye:

- Archivos de configuración y control del sistema hidropónico autónomo.
- Código del modelo SAC y entorno de simulación.
- Registro de métricas científicas (JSON, CSV).
- Scripts de visualización y validación experimental.