

**UNIVERSIDAD PRIVADA DE TACNA
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA**



TESIS

**“DISEÑO Y SIMULACIÓN DE UN SISTEMA DE CONTROL
AUTOMATIZADO BASADO EN ESP32 Y HMI PARA LA
DOSIFICACIÓN ÓPTIMA DE SOLUCIÓN NUTRITIVA EN
FUNCIÓN DEL MONITOREO DE VARIABLES
AMBIENTALES Y DE CULTIVO EN
HIDROPONÍA, TACNA 2025”**

**PARA OPTAR:
TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO ELECTRÓNICO**

PRESENTADO POR:

Bach. ALEX SANTIAGO CHOQUE ENCINAS

TACNA – PERÚ

2025

**UNIVERSIDAD PRIVADA DE TACNA
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA**

TESIS

**“DISEÑO Y SIMULACIÓN DE UN SISTEMA DE CONTROL
AUTOMATIZADO BASADO EN ESP32 Y HMI PARA LA
DOSIFICACIÓN ÓPTIMA DE SOLUCIÓN NUTRITIVA
EN FUNCIÓN DEL MONITOREO DE VARIABLES
AMBIENTALES Y DE CULTIVO EN
HIDROPONÍA, TACNA 2025”**

Tesis sustentada y aprobada el 23 de diciembre del 2025; estando el jurado calificador integrado por:

PRESIDENTE : Mtro. CARLOS ARMANDO RODRIGUEZ SILVA

SECRETARIO : Msc. MILAGROS GLENY COHAILA GONZALES

VOCAL : Dr. RAÚL CARTAGENA CUTIPA

ASESOR : Mag. MARCO ANTONIO COLOMA YUNGANINA

DECLARACIÓN JURADA DE ORIGINALIDAD

Yo, Alex Santiago Choque Encinas, egresado de la Escuela Profesional de Ingeniería Electrónica de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Privada de Tacna, identificado con DNI 44881673 respectivamente, así como Mag. Marco Antonio Sebastián Coloma Yungarina con DNI 04430636; declaramos en calidad de autor y asesor que:

1. Somos los autores de la tesis titulado: *Diseño y simulación de un sistema de control automatizado basado en ESP32 y HMI para la dosificación óptima de solución nutritiva en función del monitoreo de variables ambientales y de cultivo en Hidroponía, Tacna 2025*, la cual presentamos para optar el *Título Profesional de Ingeniero Electrónico*.
2. La tesis es completamente original y no ha sido objeto de plagio, total ni parcialmente, habiéndose respetado rigurosamente las normas de citación y referencias para todas las fuentes consultadas.
3. Los datos presentados en los resultados son auténticos y no han sido objeto de manipulación, duplicación ni copia.

En virtud de lo expuesto, asumimos frente a *La Universidad* toda responsabilidad que pudiera derivarse de la autoría, originalidad y veracidad del contenido de la *tesis*, así como por los derechos asociados a la obra.

En consecuencia, nos comprometemos ante a *La Universidad* y terceros a asumir cualquier perjuicio que pueda surgir como resultado del incumplimiento de lo aquí declarado, o que pudiera ser atribuido al contenido de la tesis, incluyendo cualquier obligación económica que debiera ser satisfecha a favor de terceros debido a acciones legales, reclamos o disputas resultantes del incumplimiento de esta declaración.

En caso de descubrirse fraude, piratería, plagio, falsificación o la existencia de una publicación previa de la obra, aceptamos todas las consecuencias y sanciones que puedan derivarse de nuestras acciones, acatando plenamente la normatividad vigente.

Tacna, 23 de diciembre de 2025


Alex Santiago Choque Encinas
DNI: 44881673


Marco Antonio Sebastián Coloma Yungarina
DNI: 04430636

DEDICATORIA

A Dios, por guiar cada paso de mi camino. A mis padres, por su amor incansable y apoyo incondicional. A mis maestros, por sembrar en mí la semilla del conocimiento.

Y a quienes creyeron en este sueño, que hoy se hace realidad con esfuerzo y fe.

Alex Santiago Choque Encinas

AGRADECIMIENTO

A Dios, por darme fortaleza y sabiduría para culminar este desafío. A mis padres, por ser mi sustento emocional y motivarme a superar cada obstáculo. A mi asesor, Mag. Marco Antonio Sebastián Coloma Yunganina, por su paciencia, guía invaluable y críticas constructivas. A mis amigos y colegas, por su apoyo incondicional en los momentos clave. Y a todas las personas que, directa o indirectamente, contribuyeron a que este proyecto se concrete.

Alex Santiago Choque Encinas

ÍNDICE GENERAL

PÁGINA DE JURADOS	iii
DECLARACIÓN JURADA DE ORIGINALIDAD	iii
DEDICATORIA	iv
AGRADECIMIENTO	v
ÍNDICE GENERAL.....	vi
ÍNDICE DE TABLAS	viii
ÍNDICE DE FIGURAS.....	ix
ÍNDICE DE ANEXOS.....	xii
RESUMEN	xiii
ABSTRACT	xiv
INTRODUCCIÓN.....	1
CAPÍTULO I: EL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN.....	2
1.1. Descripción del problema	2
1.2. Formulación del problema.....	2
1.2.1. Problema general	3
1.2.2. Problemas específicos	3
1.3. Justificación e importancia	3
1.4. Objetivos	5
1.4.1. Objetivo general.....	5
1.4.2. Objetivos específicos	5
1.5. Hipótesis	5
CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO.....	6
2.1. Antecedentes de la investigación.....	6
2.2. Bases teóricas.....	6
2.2.2. Hidroponía.....	7
2.2.3. Sistema NFT	8
2.2.4. Sistema Raíz flotante.....	10
2.2.5. Aeroponía.....	11
2.2.6. Sistema de Sustrato	11
2.2.7. Solución Nutritiva	12
2.2.8. Sistema Automatizado Electrónico para hidroponía	15
2.3. Definición de términos	22
CAPÍTULO III. MARCO METODOLÓGICO.....	23
3.1. Diseño de la investigación	23

3.2.	Acciones y actividades.....	23
3.3.	<i>Materiales y/o instrumentos</i>	24
3.4.	Población y/o muestra de estudio.....	39
3.4.1.	Unidad de estudio.....	39
3.4.2.	Población.....	39
3.4.3.	Muestra.....	40
3.5.	Operacionalización de variables.....	40
3.6.	Descripción y armado del prototipo.....	41
3.7.	Procesamiento y análisis de datos.....	64
CAPÍTULO IV: RESULTADOS.....		67
4.1.	Monitoreo de variables ambientales y de cultivo.....	67
4.2.	Desarrollo del cultivo y evaluación del fruto.....	70
4.3.	Eficiencia en el uso de recursos.....	71
4.4.	Desempeño del sistema electrónico.....	73
4.5.	Observaciones adicionales.....	75
4.5.1.	<i>Limitaciones del prototipo</i>	76
4.5.2.	<i>Alcances del prototipo</i>	76
CAPÍTULO V: DISCUSIÓN.....		78
5.1.	Análisis del comportamiento del sistema.....	78
5.2.	Comparación con estudios previos.....	78
5.3.	Aporte de la automatización.....	79
5.4.	Relevancia local y proyección futura.....	79
CONCLUSIONES.....		81
RECOMENDACIONES.....		83
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....		84
ANEXOS.....		88

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Tabla de ventajas de la Hidroponía.....	8
Tabla 2. Tipos de sustrato	12
Tabla 3. Operacionalización de variables de investigación	40
Tabla 4. Valores registrados por sensores y acciones del sistema automatizado en 30 días.....	67
Tabla 5. Estimación del consumo eléctrico diario del sistema automatizado	72
Tabla 6. Costos aproximados del prototipo.....	75

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Sistema NFT	9
Figura 2. Sistema Raíz Flotante	10
Figura 3. Sistema Aeropónico	11
Figura 4. Método ADDIE	15
Figura 5. Un sensor conectado directamente a un periférico de control.	17
Figura 6. Un sensor conectado inalámbricamente a una red.....	17
Figura 7. Sensor de PH.....	18
Figura 8. Sensor de Humedad	19
Figura 9. Sensor de Temperatura	20
Figura 10. Electrodo de nivel (hilo conductor de acero inoxidable)	21
Figura 11. Sensor Emisor y Receptor	22
Figura 12. Sensor de PH.....	25
Figura 13. Sensor de Humedad	26
Figura 14. Sensor de Temperatura	27
Figura 15. Hilo conductor	28
Figura 16. Sensor infrarrojo Emisor y Receptor.....	29
Figura 17. Microcontrolador ESP32	31
Figura 18. Arduino Nano	32
Figura 19. Pantalla Nextion	33
Figura 20. Módulo de relé de estado sólido de 4 canales	34
Figura 21. Módulo Relé de 2 Canales	35
Figura 22. Minibomba Sumergible.....	36
Figura 23. Contactor trifásico de 3 polos para el control del motor de riego y mezcla. 37	
Figura 24. Bomba de agua monofásica.....	39
Figura 25 Vista frontal y lateral del montaje estructural donde se ubican el tablero de control, motor, relés y fuentes de alimentación del sistema.	42
Figura 26. Vista esquemática del bastidor estructural señalando la ubicación de los componentes principales: tablero de control, contactor de 220 V, fuente de poder, motor DC de 12 V y brazo portante de sensores	42
Figura 27. Vista esquemática del sistema completo, incluyendo el soporte estructural, tuberías de mezcla, distribución y retorno de solución nutritiva, sensores, válvulas, motor y cultivo en sustrato.	43

Figura 28. Vista anotada del sistema, señalando los principales elementos: motor, sensores, válvulas, tuberías y módulos de dosificación y riego sobre sustrato de cultivo	44
Figura 29. Montaje de la pantalla, el microcontrolador y los relés sobre la plancha plástica del tablero.....	45
Figura 30. Cableado e integración del sistema de control dentro del tablero.....	46
Figura 31. Módulo de fuentes de alimentación del sistema.....	47
Figura 32. Motor monofásico para riego y mezcla.....	48
Figura 33. Conexión hidráulica entre el motor de 220 VAC y el contenedor de solución nutritiva.....	49
Figura 34. Contactor trifásico de 220 VAC para el accionamiento del motor monofásico.....	50
Figura 35. Mecanismo de descenso para los sensores de pH y nivel de agua en el interior del contenedor de solución nutritiva Contactor	51
Figura 36. Electroválvula de llenado al tanque principal, con tubería de entrada proveniente de un reservorio auxiliar de 1000 L.....	52
Figura 37. Tubería de riego con electroválvula y válvula de bola para regulación manual del caudal.....	53
Figura 38. Sistema de retorno de solución nutritiva desde los baldes de cultivo hacia el contenedor principal mediante codos de PVC conectados a una tubería colectora inferior.....	54
Figura 39. Sustrato con planta de tomate, gotero de riego y sensor de humedad de suelo.....	55
Figura 40. Sensor de nivel y de PH, montados de brazo.....	56
Figura 41. Sensor de temperatura DS18B20 instalado en la parte superior del módulo de control.....	57
Figura 42. Motor DC de 12 V encargado de subir y bajar el brazo que sostiene los sensores de pH y nivel. Controlado mediante dos relés para inversión de giro.....	58
Figura 43. Interruptor principal	59
Figura 44. Bombas sumergibles de 12 VDC ubicadas en recipientes separados para solución A y solución B.....	60
Figura 45. Soluciones nutritivas A y B (Marca MOLINA)	61
Figura 46. Solución hidropónica para etapa de fructificación de tomate.....	62
Figura 47. Subsistema de dosificación de soluciones A y B.....	63
Figura 48. IDE de Arduino.....	64
Figura 49. Nextion Editor.....	65

Figura 50. Nivel de pH registrado durante 30 días en la solución nutritiva del sistema hidropónico.....	68
Figura 51. Temperatura registrada durante 30 días en el sistema hidropónico automatizado.....	68
Figura 52. Humedad del sustrato registrada durante 30 días.	69
Figura 53. Lectura en tiempo real del sistema automatizado en la pantalla HMI.	69
Figura 54. Etapas de crecimiento del cultivo de tomate bajo el sistema automatizado de dosificación y riego.	71
Figura 55. Proceso de riego automático activado por el sistema.....	74
Figura 56. Mezcla y recirculación de la solución nutritiva en el tanque principal.....	74

ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo 1. Matriz de consistencia	89
Anexo 2. Interfaz en Nextion Editor	91
Anexo 3. Diagrama de conexiones del sistema basado en ESP32.....	92
Anexo 4. Diagrama de conexiones del subsistema controlado por el Arduino Nano...	93
Anexo 5. Código fuente del ESP32 #include <OneWire.h>	94
Anexo 6. Código fuente del Arduino Nano	102
Anexo 7. Diagrama de flujo del sistema automatizado.	104

RESUMEN

El presente trabajo de investigación titulado “Diseño y simulación de un sistema de control automatizado basado en ESP32 y HMI para la dosificación óptima de solución nutritiva en función del monitoreo de variables ambientales y de cultivo en hidroponía, Tacna 2025” propone el desarrollo de un sistema integrado que optimice el suministro de nutrientes en cultivos hidropónicos mediante tecnología accesible y escalable. El enfoque principal es la automatización del proceso de dosificación, basado en el monitoreo en tiempo real de variables críticas como pH, temperatura y humedad del sustrato, utilizando sensores conectados a un microcontrolador ESP32. El sistema emplea una interfaz HMI (Nextion) para visualización y control local, permitiendo ajustes manuales o automáticos según las necesidades del cultivo de tomate. La arquitectura del sistema combina hardware de bajo costo (sensores analógicos/digitales, actuadores y bombas dosificadoras) con software programado en Arduino IDE, garantizando precisión en la entrega de nutrientes y adaptabilidad a cambios ambientales. Como resultado, se espera reducir el desperdicio de solución nutritiva, mejorar la productividad del cultivo y ofrecer una alternativa tecnológica viable para agricultores de Tacna, donde la escasez de agua y la salinidad del suelo son limitantes. La implementación de este sistema podría extenderse a otros cultivos hidropónicos, contribuyendo a la agricultura de precisión en la región.

Palabras clave: Automatización agrícola; hidroponía; ESP32; HMI; solución nutritiva; monitoreo en tiempo real.

ABSTRACT

This research work, titled "Design and Simulation of an Automated Control System Based on ESP32 and HMI for the Optimal Dosing of Nutrient Solution Through the Monitoring of Environmental and Crop Variables in Hydroponics, Tacna 2025," proposes the development of an integrated system to optimize nutrient supply in hydroponic crops using accessible and scalable technology. The main focus is the automation of the dosing process, based on the real-time monitoring of critical variables such as pH, temperature, and substrate humidity, using sensors connected to an ESP32 microcontroller. The system uses an HMI (Nextion) interface for local visualization and control, allowing for manual or automatic adjustments according to the needs of the tomato crop. The system architecture combines low-cost hardware (analog/digital sensors, actuators, and dosing pumps) with software programmed in the Arduino IDE, ensuring precision in nutrient delivery and adaptability to environmental changes. As a result, it is expected to reduce nutrient solution waste, improve crop productivity, and offer a viable technological alternative for farmers in Tacna, where water scarcity and soil salinity are limiting factors. The implementation of this system could be extended to other hydroponic crops, contributing to precision agriculture in the region.

Keywords: Agricultural automation; hydroponics; ESP32; HMI; nutrient solution; real-time monitoring.

INTRODUCCIÓN

La agricultura hidropónica se ha posicionado como una alternativa eficiente para regiones con limitaciones de recursos hídricos y suelos poco aptos para la agricultura tradicional, como es el caso de Tacna. En esta región, caracterizada por condiciones climáticas áridas, los cultivos convencionales enfrentan desafíos significativos para alcanzar su máximo potencial productivo. La falta de sistemas precisos para la dosificación de nutrientes genera frecuentes desbalances que afectan el rendimiento y calidad de los frutos.

Actualmente, los productores con sistemas hidropónicos en Tacna enfrentan dificultades para mantener un suministro preciso de solución nutritiva, lo que afecta directamente su rendimiento y calidad. Esta tesis propone desarrollar un sistema automatizado basado en el microcontrolador ESP32 e interfaz HMI Nextion, que integrará sensores de pH, humedad y temperatura para monitorear y optimizar la dosificación de nutrientes en cultivos, en este caso particular, de tomate hidropónico en la ciudad de Tacna.

La implementación de este sistema no solo permitiría minimizar el consumo ineficiente de agua y nutrientes, sino que también facilitaría la adopción de técnicas de agricultura de precisión entre los productores locales. Adicionalmente, el diseño contempla características de escalabilidad para su adaptación a otros cultivos de importancia regional como lechugas y fresas los cuales comparten requerimientos similares de control ambiental y nutricional en sistemas hidropónicos, contribuyendo así a la sostenibilidad de los sistemas agrícolas en Tacna.

CAPÍTULO I: EL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

1.1. Descripción del problema

La agricultura hidropónica ha surgido como una alternativa eficiente para la producción de cultivos en regiones con limitaciones de suelo y agua, como es el caso de Tacna, Perú. Sin embargo, uno de los principales desafíos en este sistema es la dosificación precisa de la solución nutritiva, ya que un suministro inadecuado de nutrientes puede afectar negativamente el crecimiento, rendimiento y calidad de los cultivos, como el tomate. Actualmente, muchos agricultores en Tacna utilizan métodos manuales o semiautomatizados para la dosificación, lo que conlleva a errores humanos, desperdicio de recursos y falta de optimización en el uso de insumos.

Además, las variables ambientales (temperatura, humedad, luz) y los parámetros del cultivo (pH, etapa de crecimiento) no son monitoreados en tiempo real, lo que dificulta la toma de decisiones oportunas para ajustar la dosificación de nutrientes. Esto resulta en un manejo ineficiente del cultivo, afectando la productividad y sostenibilidad del sistema hidropónico.

Frente a esta problemática, surge la necesidad de desarrollar un sistema de control automatizado que permita optimizar la dosificación de solución nutritiva en función de las condiciones ambientales y de cultivo. La implementación de tecnologías como el microcontrolador ESP32 y una interfaz HMI (Human-Machine Interface) podría ofrecer una solución accesible y eficiente para los agricultores de Tacna, mejorando la precisión en la dosificación y, en consecuencia, la productividad y calidad de los cultivos hidropónicos.

1.2. Formulación del problema

La agricultura hidropónica en Tacna la gestión del uso de solución nutritiva no es eficiente, caracterizada por dos factores principales: (1) la dependencia de métodos manuales o semiautomatizados para la dosificación, lo que genera imprecisión y desperdicio de recursos; y (2) la falta de monitoreo en tiempo real de variables ambientales (temperatura, humedad) y parámetros del cultivo (pH, etapa de crecimiento). Esta situación deriva en una baja optimización del suministro de nutrientes, afectando directamente la productividad, la calidad del cultivo y la sostenibilidad económica de los productores locales.

1.2.1. Problema general

¿Cómo diseñar y simular un sistema de control automatizado basado en ESP32 y HMI para optimizar la dosificación de solución nutritiva en cultivos hidropónicos en Tacna, considerando variables ambientales y de cultivo?

1.2.2. Problemas específicos

- a. ¿Cómo implementar un sistema de monitoreo en tiempo real de variables ambientales y de cultivo para optimizar la dosificación de solución nutritiva en cultivos hidropónicos?
- b. ¿De qué manera se puede garantizar una dosificación eficiente de solución nutritiva en cultivos hidropónicos mediante un sistema automatizado?
- c. ¿Es posible diseñar un sistema accesible y de bajo costo basado en ESP32 y HMI para la automatización de la dosificación de solución nutritiva en hidroponía?

1.3. Justificación e importancia

La implementación de un sistema de control automatizado para la dosificación de solución nutritiva en cultivos hidropónicos se justifica por las siguientes razones:

Necesidad de precisión en la dosificación: La dosificación manual o semiautomatizada de solución nutritiva en hidroponía suele ser imprecisa, lo que genera desequilibrios nutricionales en las plantas, afectando su crecimiento y rendimiento. Un sistema automatizado permitiría ajustar la dosificación en función de las necesidades reales del cultivo, optimizando el uso de recursos.

Falta de monitoreo en tiempo real: Actualmente, en Tacna, no se monitorean en tiempo real las variables ambientales (temperatura, humedad) ni los parámetros del cultivo (pH, etapa de crecimiento). Esto dificulta la toma de decisiones oportunas para ajustar la dosificación de nutrientes, lo que impacta negativamente en la productividad.

Accesibilidad tecnológica: El uso de tecnologías como el microcontrolador ESP32 y una interfaz HMI (Human-Machine Interface) ofrece una solución accesible y de bajo costo para los agricultores de la región, permitiéndoles adoptar herramientas avanzadas sin necesidad de grandes inversiones.

Sostenibilidad ambiental: La optimización de la dosificación de solución nutritiva reduce el desperdicio de agua y nutrientes, contribuyendo a una agricultura más sostenible y respetuosa con el medio ambiente.

Impacto económico y social: Un sistema automatizado mejoraría la rentabilidad de los cultivos hidropónicos al aumentar su productividad y calidad, beneficiando directamente a los agricultores de Tacna y promoviendo el desarrollo agrícola de la región.

Importancia:

La investigación tiene una relevancia significativa en los siguientes aspectos:

Técnico-científico: Contribuye al desarrollo de tecnologías innovadoras aplicadas a la agricultura, específicamente en el campo de la automatización y el control de sistemas hidropónicos. Además, promueve el uso de herramientas como el ESP32 y las interfaces HMI en contextos agrícolas.

Económico: Al optimizar la dosificación de solución nutritiva, se reduce el desperdicio de insumos y se incrementa la productividad de los cultivos, lo que se traduce en mayores ingresos para los agricultores y una mejora en la competitividad del sector agrícola de Tacna.

Social: El sistema propuesto es accesible y fácil de usar, lo que permite a los agricultores locales adoptar tecnologías avanzadas sin necesidad de conocimientos técnicos especializados. Esto fomenta la inclusión tecnológica y el desarrollo de capacidades en la región.

Ambiental: Al minimizar el desperdicio de agua y nutrientes, el sistema contribuye a una agricultura más sostenible, reduciendo el impacto ambiental y promoviendo el uso eficiente de los recursos naturales.

Regional: Tacna es una región con condiciones climáticas particulares y limitaciones de recursos hídricos. La implementación de este sistema podría convertirse en un modelo replicable para otras zonas con características similares, impulsando la agricultura de precisión en el país.

La justificación e importancia de esta investigación radican en su potencial para resolver problemas técnicos, económicos, sociales y ambientales en la agricultura hidropónica de Tacna. El desarrollo de un sistema automatizado basado en ESP32 y HMI no solo mejoraría la eficiencia y productividad de los cultivos, sino que también promovería la adopción de tecnologías innovadoras y sostenibles en la región.

1.4. Objetivos

1.4.1. Objetivo general

Diseñar y simular un sistema de control automatizado basado en ESP32 y HMI para optimizar la dosificación de solución nutritiva en función del monitoreo y control de las variables ambientales y de cultivo hidropónicos en Tacna, 2025.

1.4.2. Objetivos específicos

- a. Identificar las variables ambientales y de cultivo que influyen en la dosificación de solución nutritiva en cultivos hidropónicos.
- b. Desarrollar un sistema automatizado basado en ESP32 y HMI para controlar la dosificación de solución nutritiva en función de las variables ambientales y de cultivo.
- c. Simular y validar el sistema automatizado en un entorno controlado para garantizar la optimización de la dosificación de solución nutritiva en respuesta a las variables ambientales y de cultivo.

1.5. Hipótesis

El diseño e implementación de un sistema automatizado basado en ESP32 y HMI Nextion permitirá optimizar la dosificación de solución nutritiva mediante el monitoreo continuo de pH, humedad y temperatura en cultivos hidropónicos de tomate en Tacna, mejorando significativamente la eficiencia del uso de recursos y el rendimiento del cultivo en comparación con los métodos manuales tradicionales.

- a. La identificación precisa de variables como temperatura, humedad y pH permitirá establecer parámetros adecuados para una dosificación eficiente de solución nutritiva.
- b. La implementación de un sistema automatizado con ESP32 y HMI garantizará un monitoreo continuo que contribuirá a reducir el error humano en la dosificación de nutrientes.
- c. La validación del prototipo en un entorno controlado demostrará que el sistema es eficiente, funcional y escalable para otros cultivos hidropónicos.

CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO

2.1. Antecedentes de la investigación

Estudio sobre sistemas automatizados en hidroponía: Un estudio realizado por Martínez y Ruiz et al. (2021). desarrolló un sistema automatizado para el control de pH, temperatura y humedad en un cultivo hidropónico, utilizando microcontroladores Arduino. Los resultados mostraron una mejora del 20% en la eficiencia del uso de nutrientes.

Este antecedente respalda la viabilidad de utilizar microcontroladores para la automatización en hidroponía, aunque no se enfocó en la integración de ESP32 y HMI.

Investigación sobre dosificación de nutrientes: En el mismo estudio de Martínez y Ruiz et al. (2021), diseñaron un sistema IoT para la dosificación de solución nutritiva en cultivos hidropónicos, utilizando sensores y actuadores controlados remotamente. El sistema redujo el desperdicio de nutrientes en un 15%.

Este trabajo destaca la importancia de la dosificación precisa y el uso de tecnologías IoT, lo que refuerza la necesidad de un sistema como el propuesto.

Aplicación de ESP32 en agricultura: Martínez y Ruiz et al. (2021) implementó un sistema basado en equipos de registro automatizado en invernaderos, demostrando el valor de integrar tecnologías electrónicas avanzadas en la agricultura protegida. para el monitoreo de variables ambientales en invernaderos. Los resultados demostraron que el uso de microcontroladores es una herramienta eficiente y de bajo costo para aplicaciones agrícolas.

Aunque el artículo no utiliza explícitamente ESP32, su metodología sí evidencia la utilidad de integrar microcontroladores y sensores para monitorear variables críticas, lo que sustenta la elección del ESP32 como plataforma de control para la presente investigación.

2.2. Bases teóricas

2.2.1. Cultivo de Tomate (para este caso)

El tomate tiene su origen en América del Sur y ya formaba parte de la alimentación de los aztecas hacia el año 700 d.C. Su introducción en Europa se atribuye a los españoles tras la conquista, extendiéndose desde España hacia Italia debido a los lazos entre las

casas reales de la época, aunque también se sugiere que pudo haber llegado a Francia desde Perú o México. En sus inicios en Europa, el tomate era visto más como una planta ornamental o una rareza botánica, ya que se pensaba que podía ser tóxico debido a la presencia de solanina, una sustancia común en otras plantas de la familia de las solanáceas.

Actualmente, el tomate es un cultivo de gran relevancia a nivel mundial. En la región de Tacna, se produce alrededor de 1,300 toneladas anuales de la variedad Naomi, según datos del Servicio Nacional de Sanidad Agraria (Senasa), destinándose el 80% de esta producción a la exportación. Esta variedad se caracteriza por su adaptabilidad al cultivo en invernaderos con un solo tallo o en campo abierto sin necesidad de poda. Además, ofrece frutos de excelente color, sabor, firmeza y prolongada conservación, y puede cultivarse en suelos con salinidad moderada, lo que la hace ideal para diversas condiciones agrícolas (Ramos, 2018).

2.2.2. Hidroponía

El cultivo hidropónico es una técnica agrícola que permite el crecimiento de plantas sin la necesidad de suelo, utilizando soluciones nutritivas que proporcionan los minerales esenciales para su desarrollo. Este método es ideal para el cultivo de especies herbáceas en espacios no tradicionales, manteniendo el control sobre factores clave como la luz, la temperatura, el agua y los nutrientes.

Los cultivos hidropónicos pueden alcanzar rendimientos superiores a los de la agricultura tradicional, gracias a la eficiente disponibilidad de agua y nutrientes, así como al manejo preciso de condiciones ambientales como la radiación solar y la temperatura. Además, la densidad de siembra, la disposición de las plantas y el control de plagas y enfermedades influyen directamente en la productividad.

Actualmente, la hidroponía se presenta como una alternativa sostenible frente a la reducción de tierras agrícolas causada por la urbanización, la desertificación y el cambio climático. Su implementación en huertos urbanos, granjas verticales y sistemas domésticos promueve un enfoque más sostenible en la producción de alimentos, contribuyendo a la creación de ciudades inteligentes y resilientes Beltrano et al. (2015).

Tabla 1*Tabla de ventajas de la Hidroponía*

Ventaja	Descripción
Mayor rendimiento	Los sistemas hidropónicos pueden producir entre tres y diez veces más alimentos que la agricultura tradicional en la misma área. El suministro controlado de nutrientes acelera el metabolismo vegetal, permitiendo que las plantas completen su ciclo en aproximadamente la mitad del tiempo.
Menor contaminación ambiental	Al funcionar como sistemas cerrados, la solución nutritiva se recircula y evita la filtración hacia el suelo o cuerpos de agua. Esto reduce significativamente la contaminación por fertilizantes y pesticidas.
Adaptación a condiciones extremas	Permite cultivar en entornos hostiles, como suelos degradados, regiones áridas, espacios urbanos reducidos o zonas con condiciones climáticas severas, donde la agricultura convencional no es viable.
Eliminación de herbicidas y pesticidas	La ausencia de suelo evita la aparición de malas hierbas y limita la presencia de hongos y plagas, lo que hace innecesario el uso de herbicidas y reduce el uso de pesticidas.
Menor consumo de agua	Gracias a la recirculación de la solución nutritiva, el consumo de agua puede ser hasta 20 veces menor respecto a los sistemas agrícolas tradicionales, incrementando la eficiencia hídrica.

Nota. Ventajas de sistemas hidropónicos, adaptado de Albuja, Andrade, Lucano y Rodríguez (2021), publicado en la Revista Minerva de Investigación Científica, Vol. 2, Nº 4, pp. 45–54.

2.2.3. Sistema NFT

El sistema de película de nutrientes (NFT) es muy eficiente para el cultivo de hortalizas, ya que consiste en una fina lámina de agua enriquecida con nutrientes que circula por canales donde las raíces de las plantas absorben los elementos necesarios para su crecimiento. Es fundamental un monitoreo constante para mantener bajo control la conductividad eléctrica y el caudal de la solución, evitando así el exceso de agua en los tubos de PVC.

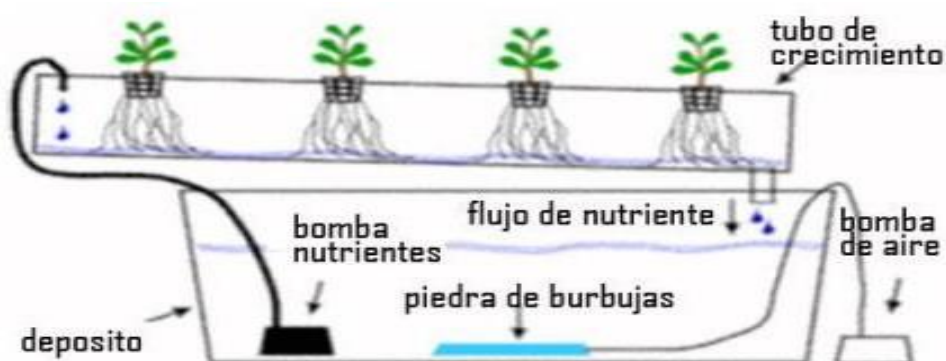
Según Garzón (2006), el método NFT se basa en la circulación continua de la solución nutritiva a través de conductos elaborados con materiales como PVC o ABS. Esta solución fluye hacia un depósito desde el cual, gracias a una bomba, regresa al sistema, creando un ciclo cerrado. Las raíces, suspendidas en pequeñas canastillas, quedan en contacto directo con la solución, lo que favorece el desarrollo óptimo de las plantas. Actualmente, este sistema se aplica comercialmente en más de 68 países, destacándose su uso en regiones árabes, el Caribe y América Latina para la producción de hortalizas hidropónicas.

Factores clave en el sistema NFT:

- Temperatura: La solución nutritiva debe mantenerse entre 13 y 15 °C para asegurar una adecuada absorción de nutrientes.
- pH: El rango ideal varía de 5.5 a 6.5, adecuado para la mayoría de los cultivos.
- Conductividad eléctrica: Se recomienda un rango de 1.5 a 3 mS/cm (750 a 1500 ppm) para evitar tanto la deshidratación de las plantas por exceso de sales como la deficiencia de nutrientes.
- Longitud del canal: No debe superar los 20 metros para cultivos de hortalizas.
- Espaciado entre plantas: Se sugiere una distancia de 15 a 30 cm para un desarrollo óptimo.

Figura 1

Sistema NFT



Nota. Técnica hidropónica que recircula una fina capa de solución nutritiva por un canal, permitiendo la oxigenación y nutrición constante de las raíces. Fuente: Araya y Morales (s.f.). Estudio técnico y económico de un sistema de producción hidropónica en un invernadero solar para el valle de Lluta. Universidad de Tarapacá.

2.2.4. Sistema Raíz flotante

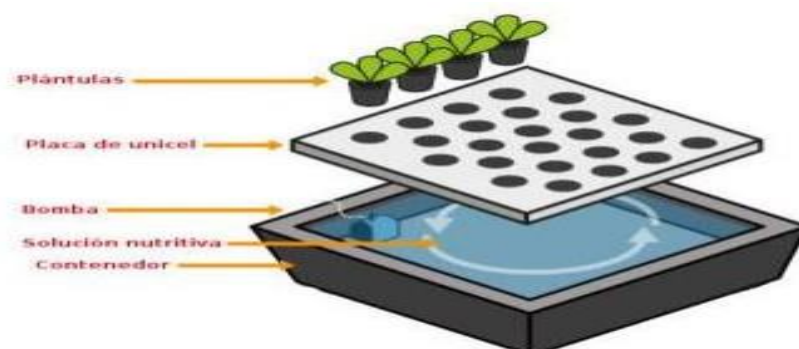
El sistema de raíz flotante consiste en cultivar plantas sobre planchas de material ligero, como unicel o poliuretano expandido, que se mantienen flotando sobre recipientes llenos de solución nutritiva constantemente oxigenada (véase figura 2). Esta técnica permite automatizar gran parte del proceso productivo y requiere un mantenimiento mínimo, limitado principalmente al control de plagas. Además, acelera el ciclo de crecimiento de diversas hortalizas al mantener las raíces en contacto permanente con una mezcla equilibrada de nutrientes (Hydro Environment, 2020).

La solución nutritiva se distribuye en canales o contenedores donde el nivel del líquido puede cubrir parcial o totalmente las raíces. Sobre estos recipientes se coloca una cubierta perforada que sirve como base para las plántulas, las cuales suelen tener entre 20 y 30 días de desarrollo previo en almácigos hidropónicos. Las perforaciones, separadas aproximadamente entre 10 y 12 cm, permiten insertar las plántulas sujetas con esponja de goma espuma para asegurar su estabilidad.

En cultivos de mayor tamaño, como tomate o fresa, es necesario incorporar soportes adicionales (estacas, cuerdas o tutores) para garantizar un crecimiento vertical adecuado. Las raíces permanecen suspendidas en una lámina de solución nutritiva en constante movimiento gracias a una bomba que mantiene la oxigenación y renovación del líquido, lo que favorece el crecimiento continuo del cultivo (Hydro Environment, 2020).

Figura 2

Sistema Raíz Flotante



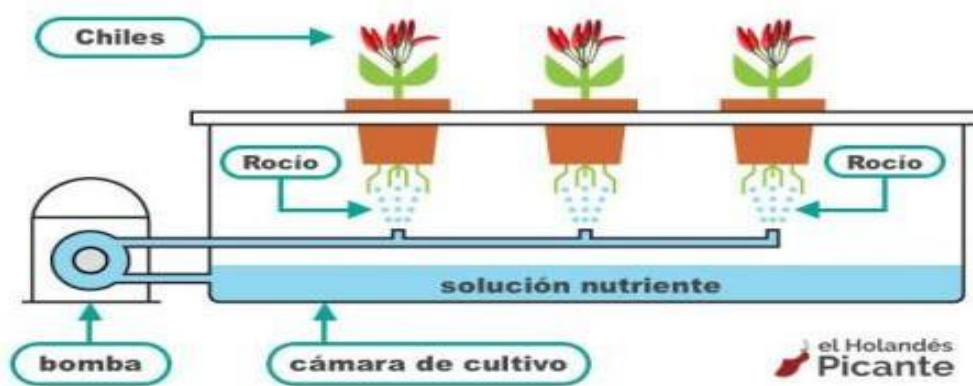
Nota. Método hidropónico donde las raíces se suspenden en una solución nutritiva oxigenada, sostenidas por una placa flotante de unicel. Fuente: (Hidroponía Río Grande, 2016).

2.2.5. Aeroponía

La aeroponía es una técnica moderna dentro de los sistemas hidropónicos, considerada una de las más avanzadas debido a su enfoque en la optimización de la absorción de oxígeno por las raíces de las plantas. Este método se desarrolló a partir de estudios sobre cómo las raíces interactúan con el oxígeno, un factor crucial para el crecimiento vegetal.

Una adecuada oxigenación es fundamental para el desarrollo saludable de los cultivos, ya que su deficiencia puede provocar serios inconvenientes, especialmente en sistemas como la Técnica de Película de Nutrientes (NFT) o el de raíz flotante (Cuevas, 2021).

Figura 3
Sistema Aeropónico



Nota. Sistema donde las raíces se mantienen suspendidas en el aire y reciben un rocío fino de solución nutritiva, maximizando la oxigenación. Fuente: (Cuevas, 2021) .

2.2.6. Sistema de Sustrato

En hidroponía, el sustrato desempeña un papel clave al actuar como un medio sólido que sustituye al suelo tradicional. Se refiere a cualquier material sólido, distinto de la tierra, que brinda soporte físico a las plantas en sistemas hidropónicos. Además de sostener la planta, cumple funciones esenciales como la retención de humedad y la facilitación del intercambio de oxígeno gracias a su porosidad.

Este tipo de medio permite que las raíces absorban agua y nutrientes de manera más eficiente, ya que no contiene materia orgánica que pueda limitar la rápida disponibilidad de estos elementos.

Un buen sustrato debe ser inerte, ofrecer estabilidad para el crecimiento radicular y asegurar la distribución adecuada de la solución nutritiva. Aunque algunos materiales cumplen con estas características por sí solos, en muchos casos se combinan distintos sustratos para optimizar sus propiedades y satisfacer las necesidades específicas del cultivo (Cuevas, 2021).

Tabla 2
Tipos de sustrato

Tipos de Sustrato	
Lana de Roca	<ul style="list-style-type: none"> • Es un sustrato inerte muy usado en la horticultura moderna. Proporciona soporte físico a las plantas y retiene eficazmente la solución nutritiva. Su estructura permite una buena aireación de las raíces, favoreciendo el crecimiento en cultivos hidropónicos.
Humus de Lombriz	<ul style="list-style-type: none"> • Fertilizante orgánico producido por lombrices rojas de California, rico en nutrientes esenciales para las plantas. Mejora la calidad del sustrato al aportar materia orgánica asimilable, sin malos olores ni exceso de humedad.
Vermiculita	<ul style="list-style-type: none"> • Mineral del grupo de las micas que, al ser calentado, expande su volumen hasta 20 veces. Su alta porosidad mejora la retención de agua y nutrientes, así como la aireación de las raíces, siendo ideal para mezclas de sustratos.
Perlita	<ul style="list-style-type: none"> • Roca volcánica expandida mediante calor, ligera y porosa, que mejora la aireación y la retención de humedad en los cultivos. Es un material inerte, libre de patógenos, ideal para sistemas hidropónicos y jardinería interior.
Fibra de Coco	<ul style="list-style-type: none"> • Sustrato natural derivado del coco, altamente absorbente, capaz de retener hasta nueve veces su peso en agua. Su pH y capacidad de intercambio catiónico lo hacen ideal para cultivos hidropónicos, con buena aireación y mínima compactación.
Cáscara de Arroz	<ul style="list-style-type: none"> • Subproducto agrícola utilizado como sustrato por su ligereza, buena aireación y capacidad de drenaje. Puede usarse cruda o carbonizada, siendo esta última más duradera y resistente a hongos. Mejora la estructura del sustrato, favoreciendo el desarrollo radicular.

Nota. Información elaborada a partir de la descripción general de técnicas de cultivo con sustratos utilizadas en hidroponía, según Albuja et al. (2021), quienes destacan la importancia de utilizar medios inertes y orgánicos para mejorar la aireación, el drenaje y la retención de humedad en cultivos hidropónicos.

2.2.7. Solución nutritiva

Las plantas están constituidas por diversos elementos químicos que obtienen del agua, del aire y del medio de crecimiento. Entre el 95 % y 98 % de su biomasa corresponde

a los elementos organogénicos: hidrógeno (H), carbono (C), oxígeno (O) y nitrógeno (N). El porcentaje restante, equivalente al 2–5 %, proviene de minerales que permanecen como cenizas tras la combustión del tejido vegetal (Favela, 2006).

Aunque en la planta se encuentran múltiples elementos, solo algunos se consideran esenciales para su desarrollo. A finales del siglo XIX se reconocían como indispensables el nitrógeno (N), fósforo (P), potasio (K), calcio (Ca), magnesio (Mg), hierro (Fe) y azufre (S). Posteriormente, durante el siglo XX, se identificó la importancia de otros elementos presentes en cantidades traza. Inicialmente fueron denominados “elementos de alta potencialidad” y luego “biocatalizadores”, debido a su función en procesos enzimáticos. En la actualidad se les conoce como micronutrientes o micronutrimientos.

El concepto de “elemento mineral esencial” fue establecido por Arnon y Stout (1939), quienes indicaron que un nutriente debe cumplir tres condiciones:

- a. La planta no puede completar su ciclo de vida sin él.
- b. Su función no puede ser sustituida por otro elemento.
- c. Participa directamente en el metabolismo, formando parte de una enzima o interviniendo en una reacción bioquímica.

Asimismo, existen elementos no esenciales pero benéficos, tales como sodio (Na), silicio (Si), cobalto (Co), níquel (Ni), aluminio (Al) y vanadio (V). Aunque no son indispensables para completar el ciclo de vida, pueden mejorar procesos fisiológicos o mitigar toxicidades causadas por otros iones (Favela, 2006).

2.2.7.1. PH en la solución nutritiva

El pH es uno de los parámetros más determinantes en el manejo de las soluciones nutritivas, ya que influye directamente en la solubilidad y disponibilidad de los iones que las plantas requieren para su crecimiento. Diversos estudios han mostrado que un pH inadecuado puede generar precipitaciones, bloquear nutrientes esenciales o disminuir su absorción, afectando el desarrollo del cultivo.

En cultivos hidropónicos, el rango más adecuado se encuentra entre 5.5 y 5.8, dado que en estas condiciones los macronutrientes —particularmente el fósforo— y micronutrientes como hierro y manganeso permanecen en formas más solubles.

Cuando el pH supera valores de 7.0–7.5, muchos de estos elementos comienzan a volverse insolubles, reduciendo su disponibilidad y favoreciendo la formación de precipitados.

El hierro es uno de los elementos más sensibles al aumento del pH. A valores superiores a 7, aproximadamente la mitad del hierro disponible puede precipitar en forma de hidróxidos, limitando su absorción. El manganeso presenta un comportamiento similar, disminuyendo su solubilidad conforme aumenta el pH. De igual forma, cuando el pH supera 6.5 se afectan la disponibilidad de fósforo y calcio, pudiendo aparecer deficiencias incluso si los elementos están presentes en cantidades suficientes.

El agua de riego también desempeña un papel fundamental en la estabilidad del pH. El ion bicarbonato (HCO_3^-), común en aguas naturales, actúa como tampón y dificulta los ajustes de acidez. Para neutralizarlo y permitir un control adecuado del pH, se emplean ácidos como el fosfórico, nítrico o sulfúrico, los cuales reaccionan con el bicarbonato y facilitan mantener la solución nutritiva dentro del rango recomendado.

Mantener el pH dentro de valores óptimos permite asegurar la máxima disponibilidad de nutrientes, evitar precipitaciones y promover un crecimiento uniforme. Además, el pH puede variar de forma natural durante el cultivo, ya que depende del equilibrio entre la absorción de cationes y aniones; por ello, su monitoreo continuo es indispensable Aguilar y Baixauli (2002).

2.2.7.2. Temperatura en la solución nutritiva

La temperatura de la solución nutritiva es un factor determinante en la eficiencia de absorción de agua y nutrientes por parte del sistema radicular. En cultivos hidropónicos de tomate, uno de los rangos térmicos más recomendados se sitúa alrededor de 20 a 22 °C, ya que en este intervalo se mantiene un equilibrio adecuado entre metabolismo vegetal, respiración radicular y disponibilidad de oxígeno.

Cuando la temperatura desciende por debajo de 18–15 °C, la actividad metabólica de las raíces disminuye de forma significativa, reduciendo la absorción de nutrientes esenciales como calcio (Ca), fósforo (P) e hierro (Fe). Esta disminución puede originar desórdenes nutricionales aun cuando los elementos estén presentes en la solución. En el caso del calcio, temperaturas bajas pueden favorecer la aparición de la pudrición apical del fruto, debido a la limitada movilidad del Ca dentro de la planta y su dependencia de un flujo transpiratorio activo.

La temperatura influye también en la concentración de oxígeno disuelto en la solución nutritiva. A medida que la temperatura aumenta, la solubilidad del oxígeno disminuye, lo cual puede provocar hipoxia radicular si no se incorpora aireación adicional. En contraste, temperaturas ligeramente más bajas favorecen una mayor concentración de oxígeno, aunque la planta reduce simultáneamente su demanda

debido a la menor intensidad metabólica. Este balance es fundamental para mantener un crecimiento radicular saludable y evitar estrés fisiológico.

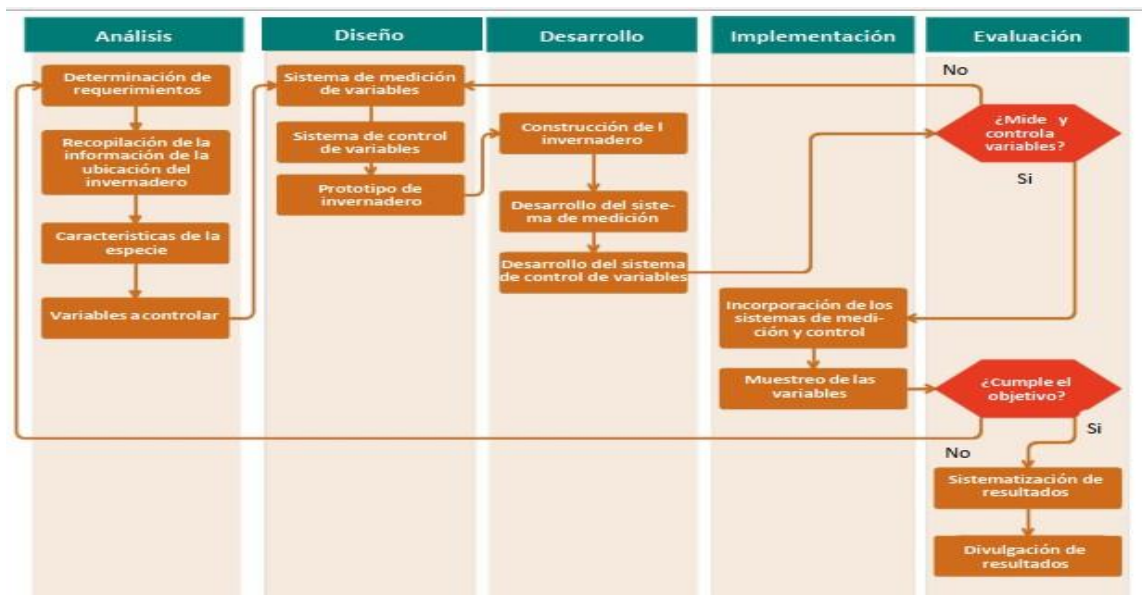
Por estas razones, se recomienda mantener la solución nutritiva cercana a 22

°C para garantizar una absorción eficiente de nutrientes y un adecuado suministro de oxígeno. En ambientes fríos, puede ser necesario recurrir a sistemas de calefacción o aislamiento térmico para evitar descensos críticos por debajo de 15 °C, mientras que en climas cálidos se requiere aumentar la aireación o emplear enfriamiento del tanque para compensar la pérdida de oxígeno disuelto (Resh, 2022).

2.2.8. Sistema automatizado electrónico para hidroponía

Según Zambrano Cortés (2014), en su investigación sobre sistemas automatizados de riego, se aplicó el método ADDIE para diseñar un prototipo que gestiona variables como temperatura, humedad relativa e iluminación mediante sensores y microcontroladores de la familia Microchip. Aunque en el presente trabajo se implementó una solución distinta basada en ESP32, el enfoque modular y automatizado propuesto por el autor sirvió como inspiración metodológica para el desarrollo del presente sistema.

Figura 4
Método ADDIE



Nota. El modelo ADDIE es un marco de trabajo para diseñar, implementar y evaluar recursos educativos. Se compone de cinco fases: análisis, diseño, desarrollo, implementación y evaluación. Fuente: Adaptado de (Zambrano, 2014).

Se diseñó un sistema basado en controladores lógicos programables (PLC) y microcontroladores de diferentes fabricantes, inicialmente gestionados desde un PC. Tras evaluar diversas opciones, se eligieron microcontroladores de la familia Microchip por su versatilidad y amplio rango de operación. Para el monitoreo de variables ambientales, se emplearon sensores analógicos que miden temperatura, humedad relativa, pH, luminosidad y niveles de CO₂.

El sistema también integró actuadores como dosificadores con motores paso a paso, ventiladores, extractores para regular la ventilación y temperatura, resistencias calefactoras, motores eléctricos, cortinas automatizadas para el control de la luz, bombas hidráulicas para la recirculación de soluciones nutritivas, agitadores para la mezcla de nutrientes y sistemas de iluminación LED para condiciones de luz artificial.

Conclusiones:

El cultivo hidropónico automatizado facilita un control eficiente de nutrientes y factores ambientales, superando desafíos presentes en cultivos tradicionales en tierra y exigiendo protocolos más rigurosos para la germinación y el desarrollo de las plantas.

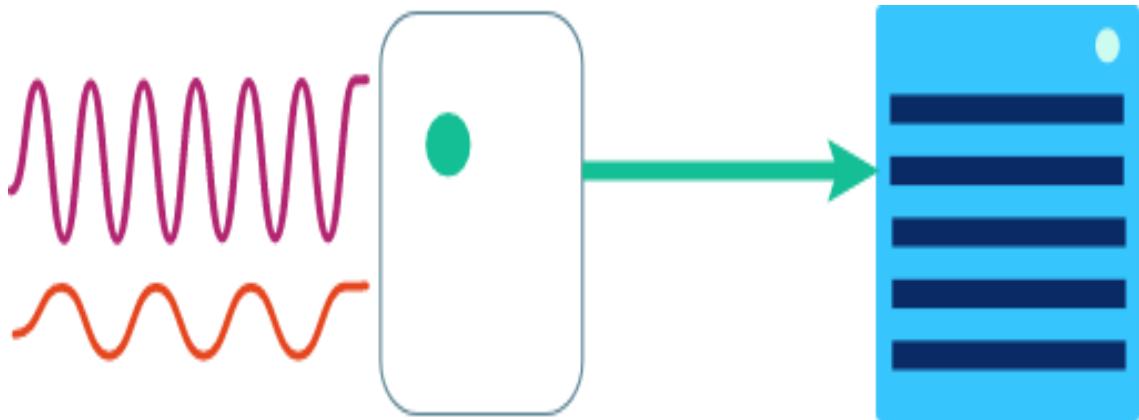
- El proyecto permitió optimizar el uso del espacio, mejorar las condiciones de vida de las especies y fomentar prácticas sostenibles para un uso responsable de los recursos naturales. Además, se identificaron variables críticas para el control automatizado y se evaluó la posibilidad de integrar nuevas sin afectar el crecimiento vegetal.
- Se recomienda actualizar los sensores por modelos más precisos para mejorar la exactitud en la medición de variables. Finalmente, se plantea la implementación de sistemas acuapónicos para optimizar el control de parámetros químicos mediante recirculación de nutrientes.

2.2.8.1. Sensores

Un sensor es un dispositivo de bajo consumo capaz de percibir ciertas características del entorno y transmitir información a otro equipo, este puede estar conectado directamente a una computadora, a un plc, microcontrolador, tarjeta de control electrónico, etc., que interprete los datos que el sensor envía, por ejemplo, sensor de temperatura, sensor de distancia, sensor de peso (véase figuras 5 y 6).

Figura 5

Un sensor conectado directamente a un periférico de control.



Nota. Representación del proceso donde un sensor capta señales del entorno y las transmite directamente a un sistema de control o procesamiento. Imagen adaptada de Khan Academy. Fuente: (Khan Academy, 2023).

Figura 6

Un sensor conectado inalámbricamente a una red



Nota. Representación del proceso donde un sensor capta señales del entorno y las transmite de manera inalámbrica a un sistema de control o procesamiento. Imagen adaptada de Khan Academy. Fuente: (Khan Academy, 2023).

Para el sistema de control automatizado se usarán 3 tipos de sensores, sensor de Ph, sensor de humedad y sensor de temperatura.

2.2.8.2. *Sensor de Ph*

Un sensor de pH es un dispositivo electrónico que mide si un líquido es ácido o alcalino. Funciona con un electrodo de vidrio que reacciona a los cambios de pH. Este electrodo tiene una membrana especial con una solución interna y un electrodo de referencia, generalmente de plata o cloruro de plata.

Cuando el sensor se sumerge en un líquido, los iones de hidrógeno interactúan con el electrodo de referencia, generando una señal eléctrica. Esta señal se convierte en un valor de pH que se muestra en una pantalla o se envía a un sistema de registro.

Los sensores de pH son muy utilizados en el tratamiento de agua, la industria alimentaria y la investigación, ya que permiten monitorear y ajustar el pH de diferentes soluciones.

Figura 7

Sensor de PH



Nota. Dispositivo electrónico que mide el nivel de acidez o alcalinidad de una solución, fundamental para el control de nutrientes en hidroponía. Fuente: Urdiales y Espín (2018).

Un sensor de pH sirve para medir si un líquido es ácido o alcalino. El pH influye en muchos procesos químicos y biológicos, por lo que estos sensores se usan en varias industrias y aplicaciones, como:

- Tratamiento de agua: Se emplean en plantas de agua potable, aguas residuales e industrias para asegurar un pH adecuado en los procesos y la desinfección.
- Agricultura: Ayudan a medir el pH del suelo y soluciones hidropónicas, ya que afecta la absorción de nutrientes y el crecimiento de las plantas.

- Industria alimentaria: Se usan en la producción de alimentos y bebidas como queso, cerveza y vino, ya que el pH influye en el sabor, textura y conservación.
- Farmacéutica: Permiten controlar el pH en medicamentos y vacunas, lo que garantiza su estabilidad y efectividad.
- Investigación científica: Se aplican en áreas como biología, química y medio ambiente para controlar el pH en experimentos y estudios.

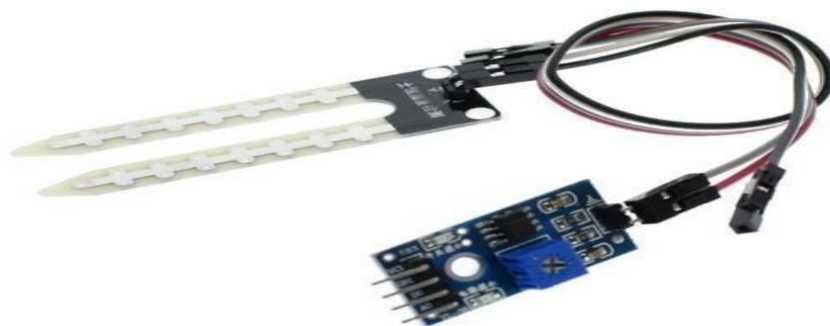
2.2.8.3. *Sensor de Humedad*

Un sensor de humedad es un dispositivo capaz de detectar y calcular la cantidad de vapor de agua presente en el aire o en diferentes materiales. Gracias a estos sensores, es posible ajustar las condiciones ambientales y evitar problemas causados por niveles inadecuados de humedad.

Los sensores de humedad del suelo son herramientas importantes para el cuidado de los cultivos, ya que permiten monitorear y ajustar las condiciones del terreno según las necesidades de las plantas. Su uso es clave en diferentes tipos de suelo, etapas de crecimiento y condiciones climáticas, ayudando a prevenir problemas causados por la falta o el exceso de agua.

Algunos sensores funcionan con tecnología de infrarrojos (IR) y pueden integrarse con imágenes satelitales para ofrecer datos constantes y precisos sobre la humedad del suelo. Cuantos más sensores se utilicen en un área determinada, más exactos serán los datos obtenidos. Además, con la ayuda de programas especializados, es posible generar mapas detallados del terreno, lo que facilita la toma de decisiones en la agricultura.

Figura 8
Sensor de Humedad



Nota. Sensor capacitivo que detecta el nivel de humedad en el sustrato, útil para automatizar el riego en sistemas hidropónicos. Fuente: (Dialnet, 2016).

2.2.8.4. Sensor de Temperatura

Un sensor de temperatura, también llamado sonda de temperatura, es un dispositivo que mide la temperatura y la convierte en una señal eléctrica para que pueda ser leída fácilmente. Su funcionamiento varía según el tipo de sensor, pero en general se basa en cómo ciertos materiales, como metales y semiconductores, cambian su resistencia eléctrica con la temperatura.

Estos sensores tienen muchas aplicaciones, como medir la temperatura corporal, monitorear sistemas de refrigeración, controlar hornos, paneles solares y equipos industriales.

Tipos de Sensores de Temperatura

- a. *Termopares*: Son los más usados debido a su bajo costo y precisión. Funcionan con dos metales diferentes unidos en un extremo, generando una señal eléctrica proporcional a la temperatura.
- b. *Sensores RTD*: Son muy resistentes y se utilizan en la industria porque soportan condiciones extremas y no se ven afectados por interferencias eléctricas. Se fabrican con platino o níquel.
- c. *Termistores (NTC y PTC)*: Son sensores con electrodos internos que detectan el calor y lo miden mediante cambios en la resistencia eléctrica de sus materiales semiconductores.
- d. *Sensores Infrarrojos*: Permiten medir la temperatura sin contacto, ideales para objetos en movimiento o lugares de difícil acceso. Pueden medir desde -20°C hasta 2.000°C y se pueden configurar mediante software.

Figura 9

Sensor de Temperatura



Nota. Sensor digital resistente al agua que mide la temperatura del ambiente o solución nutritiva, ideal para monitoreo en hidroponía. Fuente: Urdiales y Espín (2018).

2.2.8.5. **Sensor de Nivel tipo electrodo**

Además de los sensores de temperatura, humedad y pH, el sistema incluye un sensor de nivel de tipo electrodo, basado en un hilo conductor de acero inoxidable. Este sensor permite detectar el nivel del líquido en el tanque de forma confiable, especialmente en soluciones conductivas como la solución nutritiva, funcionando como un interruptor que cierra o abre el circuito según el nivel alcanzado.

Figura 10

Electrodo de nivel (hilo conductor de acero inoxidable)

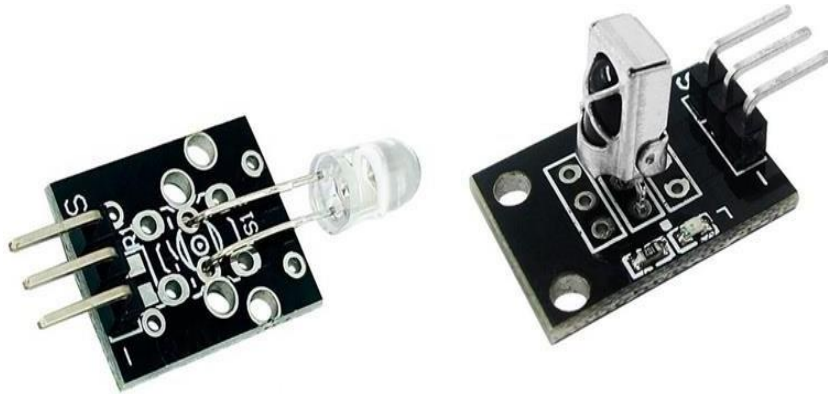


Nota. Sensor de nivel económico y confiable para líquidos conductivos como solución nutritiva, funciona como interruptor que cierra el circuito al alcanzar el nivel de líquido. Fuente: (Electromanía, 2025).

2.2.8.6. **Sensor infrarrojo emisor y receptor**

Se emplea un sistema de comunicación por infrarrojos compuesto por un emisor KY-005 y un receptor KY-022, que permiten la transmisión de señales desde el microcontrolador principal hacia un módulo auxiliar de control. El emisor KY-005 convierte una señal digital del microcontrolador en destellos infrarrojos modulados. Por su parte, el receptor KY-022 detecta la señal infrarroja a 38 kHz, demodula la señal y entrega una salida digital al segundo microcontrolador, que activa los relés de dosificación. Esta técnica de control inalámbrico simplifica el cableado, mantiene el aislamiento eléctrico entre etapas y facilita futuras ampliaciones del sistema.

Figura 11
Sensor Emisor y Receptor



Nota. Recuperado de la Fuente: (Electromanía, s.f.)

2.3. Definición de términos

2.3.1. ESP32

El ESP32 es un microcontrolador desarrollado por Espressif Systems, diseñado para aplicaciones que requieren conectividad Wi-Fi y Bluetooth. Cuenta con un procesador de doble núcleo de 32 bits, capaz de operar entre 80 MHz y 240 MHz, permitiendo un alto rendimiento en diversas tareas. Este módulo integra todas las funciones necesarias para la comunicación inalámbrica, lo que facilita su uso en proyectos de automatización y sistemas inteligentes. Gracias a su compatibilidad con el Internet de las Cosas (IoT), es ampliamente utilizado en domótica, permitiendo la conexión con asistentes virtuales como Alexa para el control remoto de dispositivos (Loor, 2021, p. 12).

2.3.2. Automatización

La automatización se refiere a la reducción o eliminación de la intervención humana en procesos productivos mediante el uso de sistemas mecánicos, electrónicos y computarizados. Su objetivo principal es optimizar la eficiencia y precisión en la producción.

Este concepto implica la integración de tecnologías avanzadas para mejorar la gestión y control de los procesos. Se compone de una parte operativa, encargada de ejecutar las tareas dentro del sistema, y una parte de control, que supervisa la calidad, la administración de herramientas y la coordinación general del proceso. Romero, Propuesta de automatización de los procesos de verificación y despachos en una empresa panificadora, 2009, p. 18).

CAPÍTULO III: MARCO METODOLÓGICO

3.1. Diseño de la investigación

Este proyecto se basa en un enfoque experimental, ya que implica el diseño, desarrollo y comprobación de un sistema automatizado utilizando componentes como el microcontrolador ESP32, Pantalla Nextion, sensores de temperatura, humedad y temperatura.

El propósito de esta metodología es integrar estos dispositivos en un prototipo funcional que permita monitorear y regular las condiciones ambientales. Durante la experimentación, se evaluará el desempeño del sistema en un entorno controlado, ajustando parámetros como la lectura de sensores, la frecuencia de riego y la eficiencia en la transmisión de datos en tiempo real mediante el ESP32 y la pantalla Nextion.

3.2. Acciones y actividades

Las acciones y actividades se definieron en pasos para explicar cómo instalar y controlar el proceso del sistema Hidropónico de tomates:

3.2.1. Investigación de información teórica

Se realizó la búsqueda y revisión de información con respecto a sistemas de automatización e hidroponía de tomates.

3.2.2. Obtención de equipos y dispositivos

Se seleccionaron los equipos y dispositivos disponibles en el mercado de Tacna, como lo es el microcontrolador ESP32, pantalla HMI NEXTION, servomotores, sensor de PH, sensor de Humedad, sensor de temperatura, bomba de medio hp.

3.2.3. Instalación de los equipos y dispositivos

Tanto los equipos y los dispositivos se instalaron para que trabajen en conjunto y obtener un proceso controlado y adecuado.

3.2.4. Preparación del almacigo de tomate

El almacigo se preparó después de haber instalado todos los dispositivos y equipos para evitar algún retraso para su trasplante.

3.2.5. Monitoreo y control del proceso hidropónico

Una vez trasplantado el almacigo se realizó el monitoreo del control del tiempo de riego, control de la cantidad de riegos, control del PH de la solución nutritiva, control de humedad del sustrato, control de temperatura del ambiente.

3.2.6. Análisis y conclusiones de datos obtenidos

Se realizó el análisis de datos para la optimización de futuras cosechas

3.3. Materiales y/o instrumentos

3.3.1. Sensor de PH

Medidor de PH Análogo V2 analógico está diseñado para medir el nivel de pH en una solución, proporcionando información sobre su acidez o alcalinidad. Es utilizado en aplicaciones como acuaponía, acuicultura y análisis de calidad del agua (Figura 12).

La versión 2 del sensor incorpora un regulador en la misma placa, permitiendo su alimentación con voltajes de 3.3V a 5.5V DC. Además, la señal de salida pasa por un filtro de hardware tipo pasa-bajos, mejorando su estabilidad. La calibración se realiza mediante el método de dos puntos, permitiendo ajustar la medición con soluciones estándar de pH 4.0 y 7.0.

El sensor funciona en conjunto con una placa de control y una librería que facilita su integración sin necesidad de soldaduras adicionales. La sonda mide el pH de una solución, registrando la concentración de iones de hidrógeno. El pH se expresa en una escala de 0 a 14, donde un valor de 7 indica una solución neutra, valores menores a 7 reflejan acidez y valores mayores a 7 indican alcalinidad.

Figura 12

Sensor de PH



Nota. Sensor diseñado para medir el pH en soluciones líquidas con alta precisión, ideal para monitoreo continuo en sistemas hidropónicos. Fuente: (Electromanía, s.f.)

3.3.2. Sensor de Humedad

El sensor de humedad de suelo capacitivo v1.2 (figura 13) está diseñado para medir la humedad del suelo utilizando el principio de capacitancia en lugar de resistencia, lo que prolonga su vida útil. A diferencia de los sensores resistivos, este modelo incorpora una capa de protección anticorrosión en sus electrodos, evitando la oxidación y mejorando su durabilidad. Es compatible con plataformas como Arduino, PIC y ESP8266/NodeMCU/NodeMCU-32.

El sensor permite monitorear la humedad del suelo en aplicaciones agrícolas o de jardinería, y puede integrarse en sistemas automatizados de riego al combinarlo con válvulas o bombas de agua. Además, si se conecta a Internet, es posible supervisar y controlar el riego de manera remota.

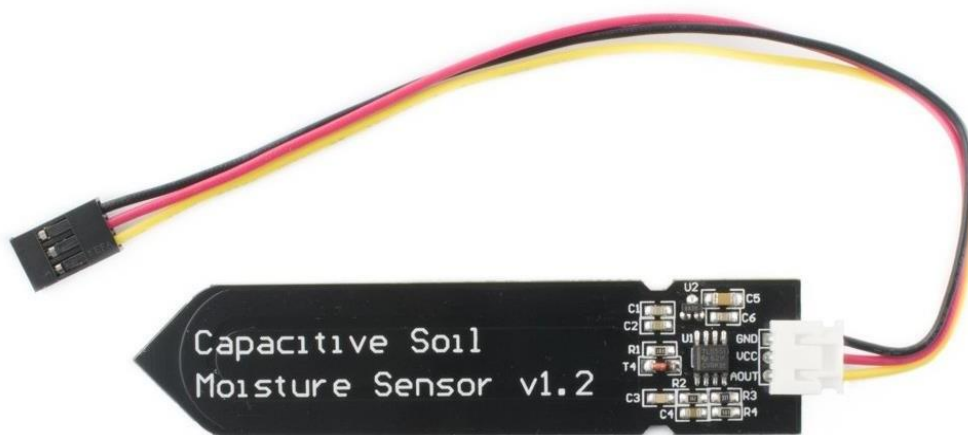
El principio de funcionamiento se basa en la medición de la capacitancia entre dos electrodos insertados en el suelo. La capacitancia varía en función del nivel de humedad, en suelos húmedos es baja, mientras que en suelos secos es alta. La señal captada por los electrodos es procesada por una tarjeta de acondicionamiento, que genera una salida

analógica proporcional al nivel de humedad. Esta señal varía entre 0V para suelos húmedos y 5V para suelos secos.

- Voltaje de alimentación: 3.3V - 5V DC
- Corriente operación: 5mA
- Voltaje de la señal de salida: 0 a 5V (Analógico)

Figura 13

Sensor de Humedad



Nota. Dispositivo que mide la humedad del sustrato sin corrosión, ideal para riego automático en sistemas hidropónicos o agrícolas. Fuente: Electromanía. (s.f.).

3.3.3. Sensor de temperatura

El sensor digital de temperatura DS18B20, desarrollado por MAXIM, es un dispositivo resistente al agua diseñado para medir la temperatura en diversas aplicaciones (véase figura 14). Es compatible con microcontroladores como Arduino, PIC y ESP8266/ESP32.

Este sensor integra internamente los circuitos necesarios para la captura de temperatura, el procesamiento de la señal, la conversión de datos analógicos a digitales y la comunicación digital. Utiliza un protocolo de comunicación conocido como 1-Wire, lo que permite transmitir la información mediante un solo cable de datos. Además, cuenta con un identificador único de fábrica, lo que permite la conexión de múltiples sensores en el mismo bus sin interferencias.

Entre sus aplicaciones más comunes se encuentra el monitoreo de temperatura en sistemas de climatización, control de temperatura en maquinaria, supervisión de procesos industriales y medición en entornos automatizados.

- Voltaje de operación: 3.0V – 5.5V DC
- Rango de medición: -55°C hasta +125°C (-67°F a +257°F)
- Precisión en el rango de -10°C hasta +85°C: $\pm 0.5^\circ\text{C}$.
- Resolución ADC seleccionable de 9-12 bits
- Cables: Rojo (+VCC), Blanco (DATA 1-Wire), Negro (GND)
- Protocolo 1-Wire, solo necesita 1 pin para comunicarse
- Identificación única de 64 bits
- Longitud de cable: 1m

Figura 14

Sensor de Temperatura



Nota. Sensor digital sumergible que mide con precisión la temperatura, ideal para soluciones nutritivas en sistemas hidropónicos. Fuente: Electromanía. (s.f.).

3.3.4. Sensor de nivel tipo electrodo

Fabricado a partir de hilo conductor de acero inoxidable de 1,2 mm (véase figura 15). Este sensor se conecta directamente a una entrada digital del ESP32 y funciona bajo el principio de conductividad del líquido.

Explicación del funcionamiento como sensor de nivel tipo “switch”: El sensor de nivel está compuesto por dos electrodos de acero inoxidable que se sumergen en la solución nutritiva del tanque. Estos actúan como contactos eléctricos— cuando el líquido sube hasta cubrir ambos electrodos, se completa el circuito eléctrico

debido a la conductividad del líquido, enviando una señal digital alta al microcontrolador (ESP32). Cuando el nivel baja, el circuito se abre y la señal cambia a nivel bajo. Este sensor funciona como un interruptor que se cierra o abre dependiendo del nivel de líquido. A diferencia de sensores ultrasónicos como el HC-SR04, no se ve afectado por espuma, salpicaduras o la geometría del tanque, lo que lo hace más fiable para aplicaciones con soluciones nutritivas.

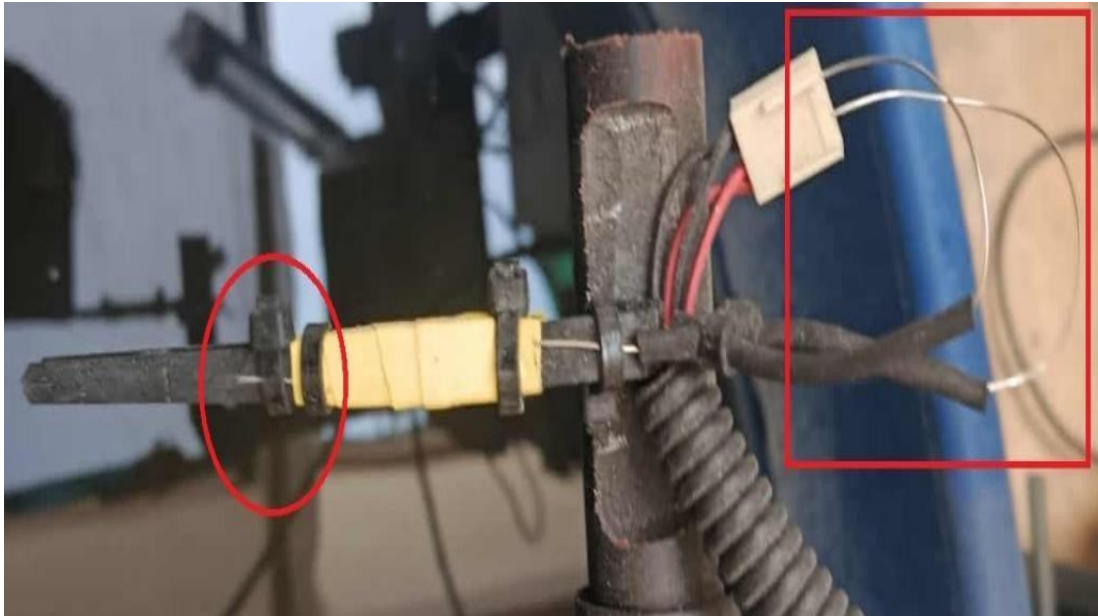


Figura 15

Hilo conductor

Nota. Sensor de nivel casero basado en hilo conductor de acero inoxidable. Funciona como un interruptor (switch) al cerrarse el circuito entre los electrodos cuando están en contacto con una solución conductiva, permitiendo detectar el nivel del agua de forma fiable y de bajo costo.

3.3.5. Sensor de infrarrojo de comunicación entre microcontroladores (Emisor KY-005 / Receptor KY-022)

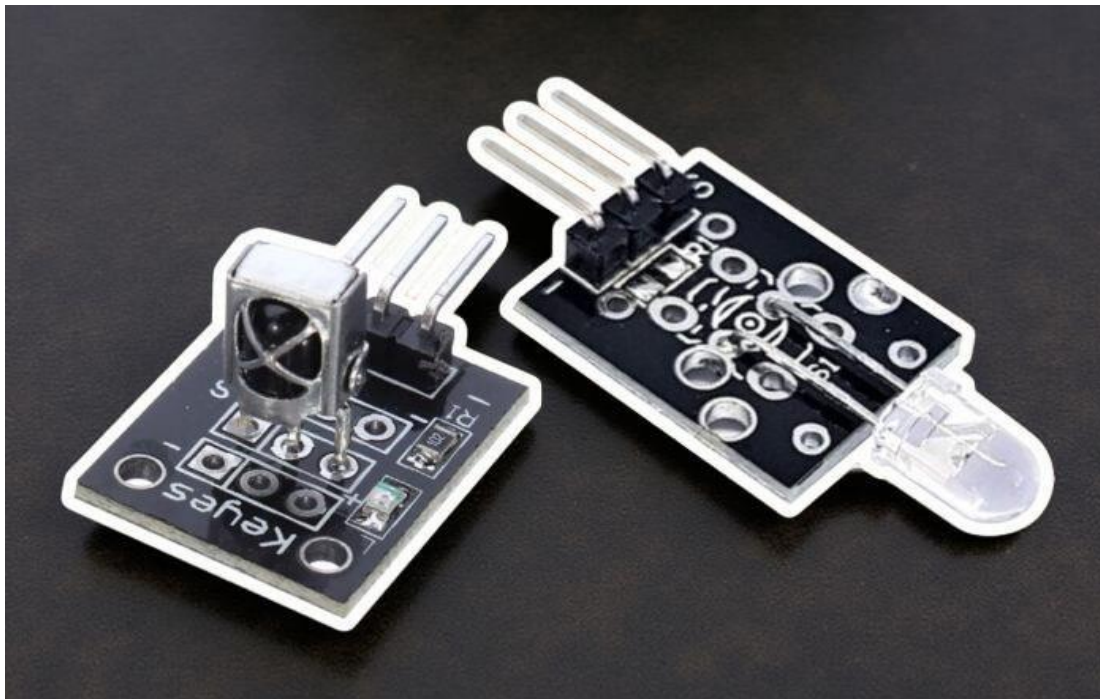
Para la sincronización entre el microcontrolador principal ESP32 y el microcontrolador auxiliar Arduino Nano destinado a la dosificación de soluciones, se empleó un sistema de transmisión por infrarrojo compuesto por el módulo emisor KY-005 y el módulo receptor KY-022 (véase figura 16).

Emisor KY-005: Voltaje de funcionamiento 5 V DC, corriente de alimentación de 30 mA a 60 mA, longitud de onda 940 nm.

Receptor KY-022: Voltaje de funcionamiento entre 2.7 V y 5.5 V DC, frecuencia de operación 38 kHz, distancia de recepción hasta 18 m, ángulo de recepción $\pm 45^\circ$.

Figura 16

Sensor infrarrojo Emisor y Receptor



Nota. Este sistema de comunicación infrarrojo permite un enlace inalámbrico sencillo para el envío de comandos desde el ESP32 hacia el Arduino Nano, que a su vez activa los relés de las bombas sumergibles de soluciones nutritivas A y B. Al integrarse ambos sensores, se reducen las conexiones físicas directas entre microcontroladores, se mejora el modularidad del sistema y se mantiene el aislamiento eléctrico entre etapas. Fuente: (Uelectronics, s.f.)

ESP32

La placa de desarrollo NodeMCU-32 DEVKIT V1 es un módulo diseñado para la creación y prueba de proyectos basados en Internet de las Cosas (IoT). Incorpora el módulo ESP-WROOM-32, que integra el SoC ESP32 como procesador principal. Además, cuenta con un convertor USB-serial CP2102 para la programación a través del puerto USB, reguladores de voltaje y LEDs indicadores.

El ESP32, fabricado por Espressif Systems, es una evolución del ESP8266 con mejoras en capacidad de procesamiento y comunicación. Soporta Wi-Fi, Bluetooth y BLE, y cuenta con un procesador de 32 bits de doble núcleo, con una frecuencia de hasta 240 MHz (véase figura 17).. También incluye diversos periféricos como sensores táctiles capacitivos, sensor de efecto Hall, amplificadores de bajo ruido, interfaz para tarjeta SD, Ethernet, SPI, UART, I²S e I²C.

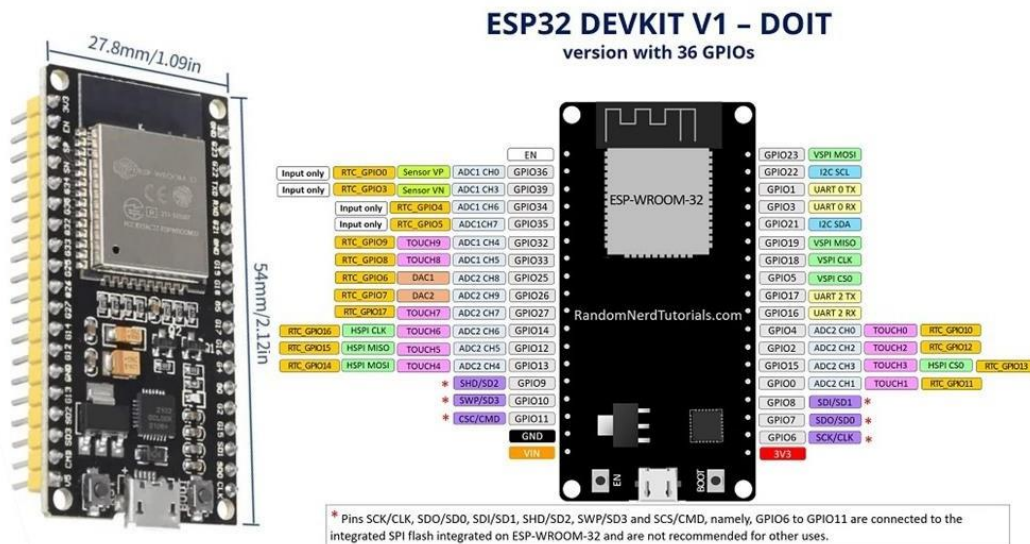
- Voltaje de Alimentación (micro-USB): 5V DC
- Voltaje de Alimentación (Vin): 4V-12V DC
- Voltaje de Entradas/Salidas: 3.3V DC
- CPU: Dual-Core Tensilica Xtensa LX6 (32 bit)
- Frecuencia de Reloj: hasta 240Mhz
- Wifi: 802.11 b/g/n/e/i (802.11n @ 2.4 GHz hasta 150 Mbit/s)
- Bluetooth: v4.2 BR/EDR, Bluetooth Low Energy (BLE)
- Memoria: 448 KB ROM, 520 KB SRAM, 16 KB SRAM in RTC, 4 MB QSPI

Flash/SRAM

- Pines: 30
- Pines Digitales GPIO: 24 (Algunos pines solo como entrada)
- Pines PWM: 16
- Pines Analógicos ADC: 18 (3.3V, 12bit: 4095, tipo SAR, ganancia programable)
- Conversor Digital a Analógico DAC: 2 (8bit)
- UART: 2
- Chip USB-Serial: CP2102
- Conector USB: micro-USB
- Seguridad: Estándares IEEE 802.11 incluyendo WFA, WPA/WPA2 and WAPI, 1024-bit OTP, up to 768-bit for customers, Aceleración criptográfica por hardware: AES, HASH (SHA-2), RSA, ECC, RNG.

Figura 17

Microcontrolador ESP32



Nota. Placa de desarrollo con conectividad Wi-Fi y Bluetooth, utilizada para control y procesamiento de datos en sistemas automatizados. Fuente: (HIFISAC, s.f.)

Arduino Nano

El Arduino Nano es un microcontrolador compacto basado en el chip ATmega328P-AU, alimentado a 5 V-12 V DC, con interfaz USB-serial y 14 pines digitales (6 de ellos PWM) y 8 entradas analógicas (véase Figura 18).

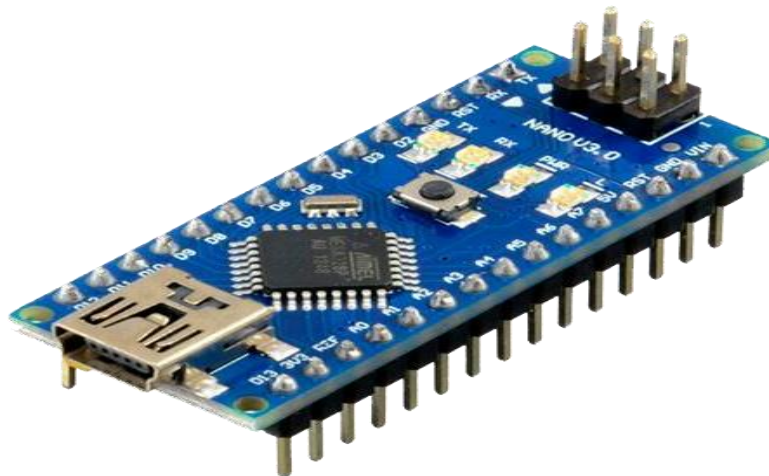
Características técnicas principales:

- Microcontrolador: ATmega328P-AU
- Frecuencia de reloj: 16 MHz
- Pines digitales: 14 (D0-D13)
- Pines analógicos: 8 (A0-A7)
- Comunicación: UART, SPI, I²C
- Tensión de alimentación: 5 V (USB) o 7-12 V (VIN)
- Interfaz USB-Serial: CH340G Justificación de uso:

Este módulo fue utilizado como microcontrolador auxiliar al ESP32 para controlar de forma independiente las mini bombas sumergibles de dosificación de soluciones nutritivas A y B. El ESP32 envía un comando infrarrojo al Arduino Nano, que luego activa los relés correspondientes según los tiempos programados. Esta arquitectura permite distribuir la carga de control, mantener el modularidad del sistema y facilitar futuras ampliaciones sin alterar el núcleo principal del ESP32.

Figura 18

Arduino Nano



Nota. (Electromanía, s.f.)

Pantalla HMI NEXTION

La pantalla Nextion HMI es un dispositivo de interfaz hombre-máquina diseñado para facilitar la interacción entre el usuario y un sistema embebido. Se comunica con un microcontrolador (MCU) periférico a través de una interfaz serial TTL (5V, TX, RX, GND), permitiendo el intercambio de datos mediante instrucciones en formato ASCII véase Figura 19).

Para el desarrollo de la interfaz gráfica, se emplea el Nextion Editor, un software que permite la creación de proyectos HMI mediante un entorno de programación basado en componentes gráficos de arrastrar y soltar. Este entorno simplifica la implementación y reduce la complejidad del diseño de la interfaz.

- Tamaño de la memoria RAM instalada 3,5 KB
- Capacidad de almacenamiento de memoria 16 MB
- Tecnología de conectividad Serie TTL

Figura 19
Pantalla Nextion



Nota. Interfaz táctil que permite visualizar datos y controlar funciones del sistema, facilitando la interacción entre el usuario y el microcontrolador. Fuente: (Amazon, s.f.)

Módulo de relé de estado sólido de 4 canales

Este módulo permite controlar cargas de corriente alterna (AC) de hasta 240V, mediante señales de control de bajo voltaje (DC), siendo adecuado para controlar dispositivos como contactores, válvulas solenoides o bombas. En este sistema se utilizó para:

- Activar un contactor trifásico de 220VAC para el arranque del motor del sistema de mezcla.
- Activar dos electroválvulas solenoides encargadas de dosificar las soluciones nutritivas A y B.
- Dejar un canal libre para futuras ampliaciones o funciones auxiliares.

Este tipo de relé no tiene partes móviles, por lo que su vida útil es mayor al de un relé mecánico. Se activa mediante una señal de nivel alto (High Level Trigger) desde un microcontrolador como el ESP32.

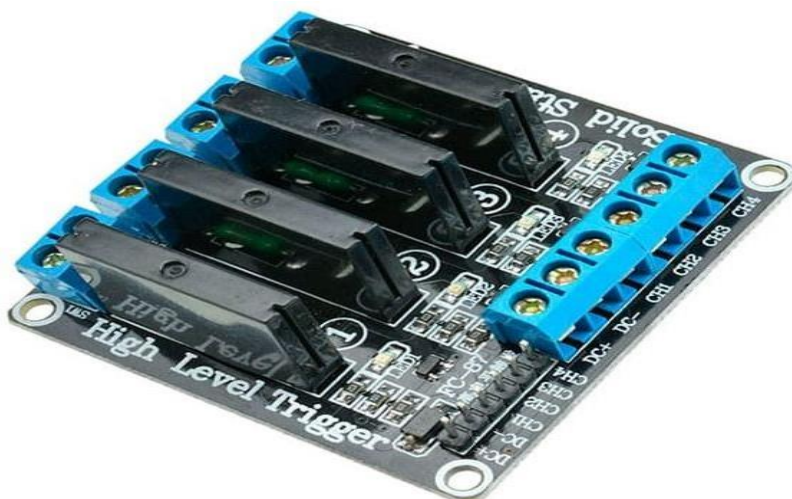
Características técnicas:

- Canales: 4 independientes

- Voltaje de entrada de control: 5 V DC
- Tipo de activación: Nivel alto (HIGH)
- Corriente de carga: Hasta 2 A por canal
- Tensión de carga: 75–264 V AC
- Indicador LED de estado por canal
- Dimensiones: 58 mm × 56 mm × 25 mm aprox.
- Aislado mediante optoacopladores

Figura 20

Módulo de relé de estado sólido de 4 canales



Nota. Utilizado para controlar el arranque del motor mediante un contactor trifásico, dos electroválvulas solenoides, y una expansión futura. Requiere señal de nivel alto para activación. Ofrece mayor durabilidad respecto a los relés mecánicos al carecer de partes móviles. Fuente: Electromanía. (s.f.).

Módulo relé de 2 canales

Este módulo será utilizado en dos instancias del sistema: uno de ellos permitirá invertir la polaridad del motor DC de 12 V que sube y baja el brazo que sostiene el sistema de riego, y el otro módulo activará las mini bombas sumergibles de bajo voltaje para la dosificación de la solución nutritiva véase Figura 21).

El módulo de relé de 2 canales es ideal para controlar cargas eléctricas de corriente alterna o continua mediante señales digitales provenientes de un microcontrolador como el ESP32. Internamente incorpora relés electromecánicos

de tipo SRD-05VDC-SL-C, optoacopladores y componentes de protección, lo cual permite aislar eléctricamente el sistema de control de las cargas de potencia.

Especificaciones técnicas:

- Tensión de operación: 5 V DC
- Corriente de operación: ~70 mA (cada canal)
- Tipo de relé: SRD-05VDC-SL-C
- Número de canales: 2
- Aislado por optoacoplador
- Capacidad de contacto:
- 10 A a 250 V AC
- 10 A a 30 V DC
- Señal de activación: Nivel bajo (LOW)
- Pines de control: IN1, IN2, VCC, GND
- Dimensiones aproximadas: 50 × 40 mm
- Indicadores LED por canal (encendido/apagado)

Figura 21

Módulo Relé de 2 Canales



Nota. Este módulo de relé es empleado para controlar cargas mediante el ESP32, permitiendo la automatización del sistema de

dosificación y elevación del brazo del riego. Fuente: Electromanía.
(s.f.).

Minibombas sumergibles 12 VDC

Dos minibombas sumergibles se encargan de extraer las soluciones nutritivas A y B desde sus respectivos recipientes hacia el tanque de mezcla. Son compactas, silenciosas y apropiadas para líquidos sin sólidos.

Características técnicas:

- Tensión nominal: 12 VDC
- Consumo: 3 W
- Caudal máximo: 240 L/h
- Altura máxima de bombeo: 3 m
- Tipo: Sumergible, continua

Figura 22

Minibomba Sumergible



Nota. Bombas silenciosas y de bajo consumo energético, adecuadas para sistemas de riego y dosificación automatizada en hidroponía. Fuente: (Naylamp Mechatronics, s.f.).

Contactor trifásico LS GMC-22

Este componente electromecánico es utilizado para el arranque y paro de motores trifásicos en sistemas de automatización. Su principal función en el presente proyecto es controlar el encendido del motor de 220 V AC que se emplea tanto para el sistema de mezcla de solución nutritiva como para el sistema de riego automatizado. Está diseñado para cargas con elevada corriente de arranque bajo categoría de uso AC3, ideal para motores de inducción (véase Figura 23).

- Modelo: LS GMC-22
- Tensión nominal de operación: 220 V AC
- Corriente nominal (AC3): 22 A
- Número de polos: 3 (3P)
- Tensión de la bobina: 220 V AC
- Aplicaciones: Arranque de motores trifásicos, control de cargas inductivas, sistemas de automatización industrial.

Figura 23

Contactor trifásico de 3 polos para el control del motor de riego y mezcla.



Nota. El contactor trifásico permite controlar cargas de alta potencia a través de señales de bajo voltaje, garantizando seguridad y aislamiento entre el sistema de control (relé SSR) y el circuito de potencia. Fuente: (Kentstore, s.f.).

Bomba de agua periférica monofásica

La bomba de agua periférica LEO modelo APM37 (véase Figura 24).es un equipo compacto y eficiente, ideal para sistemas de riego y mezcla de soluciones nutritivas en hidroponía. Su estructura permite el trabajo continuo y estable en instalaciones que requieren presurización y circulación de líquidos. En este sistema automatizado, la bomba es activada mediante un contactor trifásico y un relé de estado sólido, garantizando su integración segura con el microcontrolador (ESP32).

Características técnicas:

- Modelo: LEO APM37
- Potencia nominal: 0.5 HP (370 W)
- Tensión de alimentación: 220 V AC (monofásico)
- Frecuencia: 60 Hz
- Corriente nominal: 2.5 A aprox.
- Altura máxima de elevación (head): 35 metros
- Caudal máximo: 35 litros por minuto (2.1 m³/h)
- Diámetro de entrada/salida: 1" x 1"
- Tipo de motor: Inducción monofásico con protector térmico
- Material del cuerpo: Hierro fundido
- Impulsor: Latón
- Clase de aislamiento:
 - Protección IP: IPX4
 - Peso aproximado: 5.5 kg

Figura 24

Bomba de agua monofásica



Nota. Motor periférico monofásico de 220 VAC utilizado para el mezclado de solución nutritiva y riego del sistema. Posee características hidráulicas adecuadas para su uso en sistemas hidropónicos residenciales y de pequeña escala. Fuente: Cloudtec (s.f.).

3.4. Población y muestra de estudio

3.4.1. Unidad de estudio

La unidad de estudio de este proyecto es un sistema hidropónico automatizado de pequeña escala, implementado en un entorno doméstico ubicado en el distrito de Calana, Tacna. El sistema estará conformado por dos baldes de 20 litros, cada uno con sustrato de arrocillo y grava, utilizados para el desarrollo del cultivo de tomate. Esta configuración permite validar en condiciones reales el diseño y funcionamiento del sistema de control automatizado, en un entorno accesible y controlado.

3.4.2. Población

La población está compuesta por dos plantas de tomate, una en cada balde, las cuales serán cultivadas desde su etapa de almácigo. Estas plantas estarán

sometidas a condiciones monitoreadas a través de sensores, para evaluar el comportamiento del sistema automatizado en tiempo real.

3.4.3. Muestra

Dado que el sistema está diseñado para dos unidades de cultivo, la muestra coincide con la población, es decir, las dos plantas de tomate que serán monitoreadas mediante sensores de temperatura, humedad y pH. Los datos recolectados servirán como base para simular y validar el proceso de dosificación automática de la solución nutritiva mediante el microcontrolador ESP32.

3.5. Operacionalización de variables

En la tabla 3 se muestran las variables que se operarán.

Tabla 3

Operacionalización de variables de investigación

Variable	Definición conceptual	Dimensiones	Indicador	Escala
Independiente Variables ambientales y de cultivo	Las variables ambientales y de cultivo son los factores externos e internos.	<ul style="list-style-type: none"> • Condiciones ambientales • Parámetros del cultivo 	<ul style="list-style-type: none"> • Temperatura • Humedad • Luz • pH • Conductividad eléctrica • Etapa de crecimiento 	<ul style="list-style-type: none"> • °C • % • Intensidad lumínica ($\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$). • Niveles de pH, • (mS/cm) • Etapa de crecimiento (vegetativa, floración, fructificación)
Dependiente Dosificación de solución nutritiva		<ul style="list-style-type: none"> • Precisión en la dosificación. • Frecuencia de aplicación. • Volumen de solución nutritiva suministrada. 	<ul style="list-style-type: none"> • Error porcentual en la dosificación. • Número de aplicaciones por día. • Cantidad de solución nutritiva utilizada por ciclo de cultivo. 	

3.6. Descripción y armado del prototipo

3.6.1. Croquis general del sistema

El prototipo del sistema automatizado fue instalado sobre una estructura de soporte tipo bastidor técnico, adecuada para alojar y organizar los diversos elementos que componen el sistema de control. En esta estructura se integró el tablero principal, el cual contiene los módulos electrónicos esenciales, así como los elementos de potencia y acondicionamiento.

Sobre el bastidor se dispusieron los siguientes componentes:

Tablero de control principal, que contiene en su interior una plancha plástica perforada donde se montaron la pantalla HMI Nextion, el microcontrolador ESP32 y el módulo de relés de estado sólido.

Relé de potencia para el motor de riego, instalado externamente al tablero, destinado al control de un motor AC monofásico que se encarga del suministro de solución nutritiva al sistema hidropónico.

Fuente de alimentación del sistema de control, encargada de proporcionar energía regulada y segura para los componentes electrónicos internos.

Fuente de alimentación auxiliar para cargas de potencia, utilizada específicamente para alimentar los actuadores conectados a los relés de estado sólido y relés de contacto, garantizando un aislamiento entre señales de control y cargas de potencia.

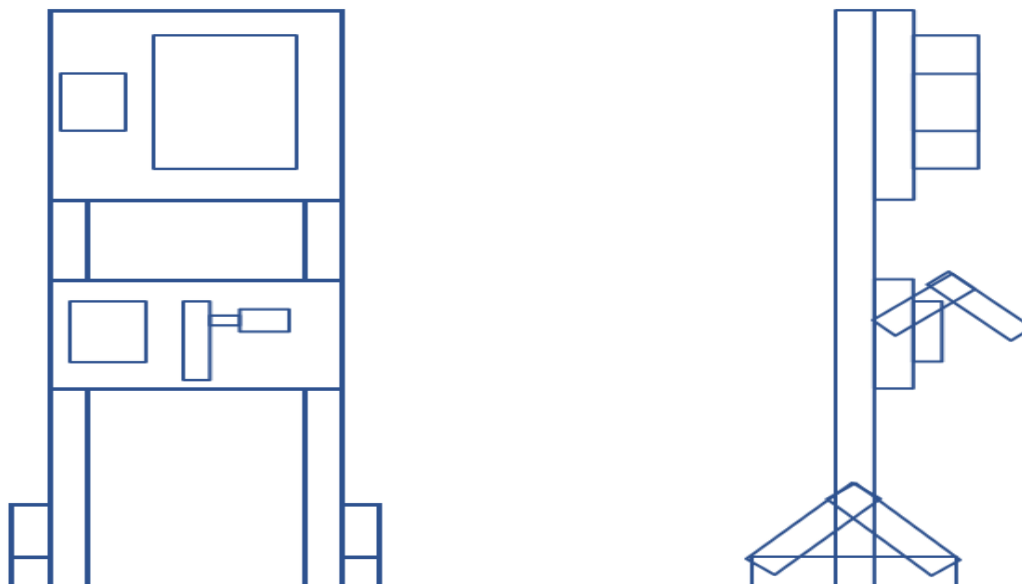
Motor DC de elevación y descenso del brazo móvil, al que se encuentran acoplados tanto el sensor de pH como el electrodo de nivel, permitiendo su inmersión y extracción automática dentro del contenedor.

Sensores ambientales: tanto el sensor de temperatura como el sensor de humedad del sustrato están conectados directamente al tablero de control.

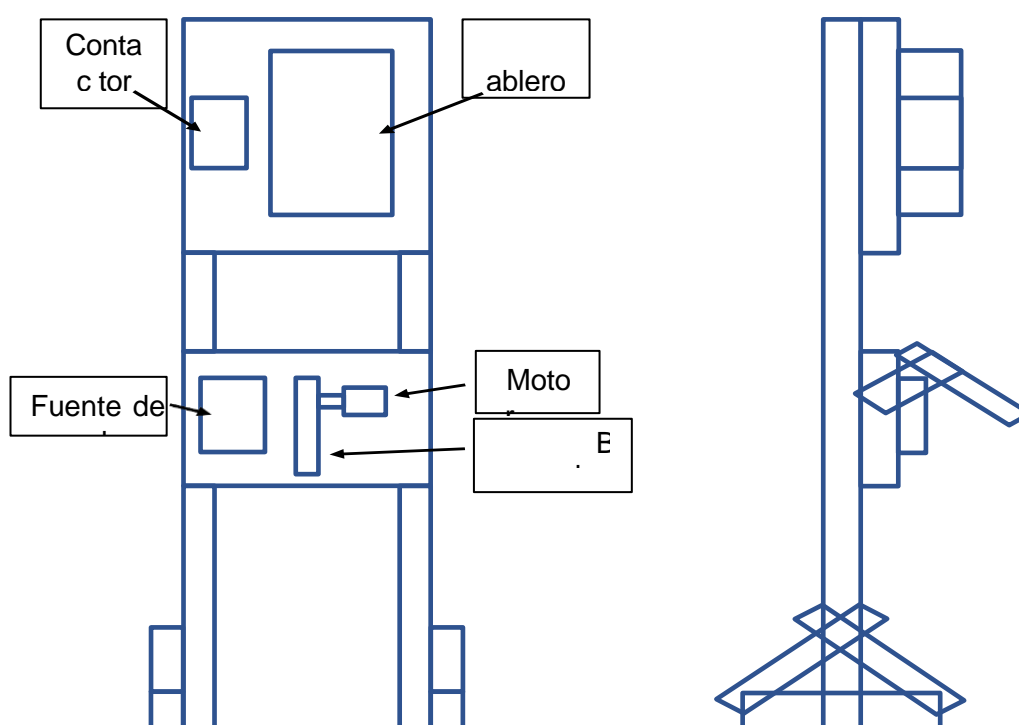
Este diseño físico integral permite no solo una organización eficiente del sistema, sino también un mantenimiento sencillo, un cableado limpio y una correcta ventilación de los componentes electrónicos. véase Figura 25 y 26.

Figura 25

Vista frontal y lateral del montaje estructural donde se ubican el tablero de control, motor, relés y fuentes de alimentación del sistema.

**Figura 26**

Vista esquemática del bastidor estructural señalando la ubicación de los componentes principales: tablero de control, contactor de 220 V, fuente de poder, motor DC de 12 V y brazo portante de sensores.



Croquis funcional del sistema automatizado de dosificación y riego

En esta representación se observa la disposición general de los componentes que integran el sistema. El prototipo se encuentra montado sobre una estructura tipo bastidor, la cual sostiene el tablero de control, las fuentes de alimentación, un motor monofásico de 220 VCA y un brazo móvil que posiciona los sensores de pH y nivel dentro del contenedor de mezcla.

El sistema cuenta con una red de tuberías diferenciadas por función: una línea para el llenado de agua, otra para la mezcla de soluciones nutritivas y una tercera para el riego y retorno. Se incorporan dos bombas sumergibles de 12 VDC para dosificar soluciones nutritivas A y B, así como dos electroválvulas: una dedicada al proceso de mezcla y otra para controlar el riego. También se incluye una válvula de bola que regula la presión hacia los aspersores.

La sensorización se complementa con un sensor de temperatura ambiental, un sensor de humedad de sustrato y un electrodo de pH, todos vinculados al microcontrolador ESP32. A partir de estos parámetros, el sistema calcula automáticamente el número de riegos (CR), la duración de cada riego (TR) y el tiempo de espera entre ciclos (TC), permitiendo así una dosificación precisa y eficiente según las condiciones del cultivo, véase Figura 27 y 28.

Figura 27

Vista esquemática del sistema completo, incluyendo el soporte estructural, tuberías de mezcla, distribución y retorno de solución nutritiva, sensores, válvulas, motor y cultivo en sustrato.

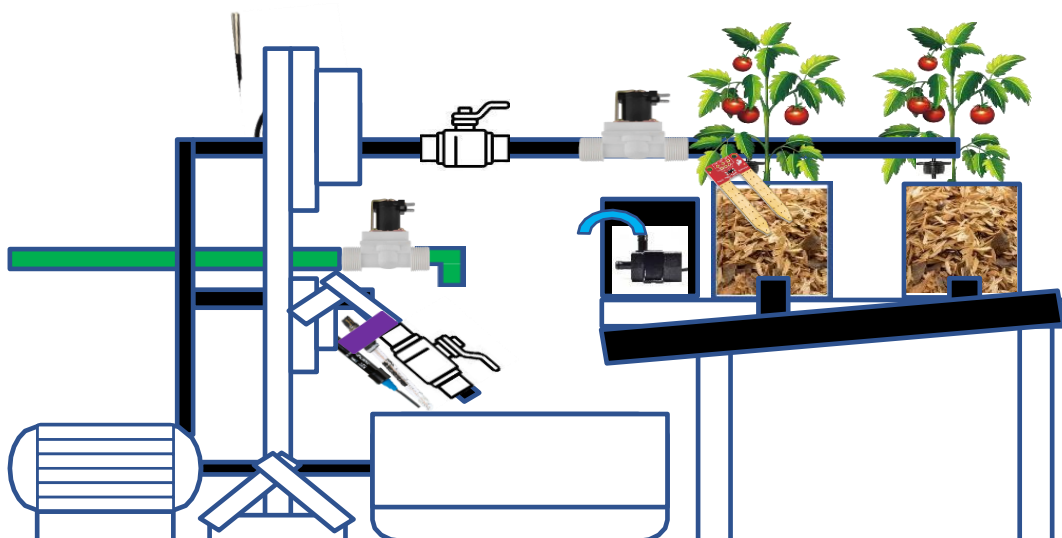
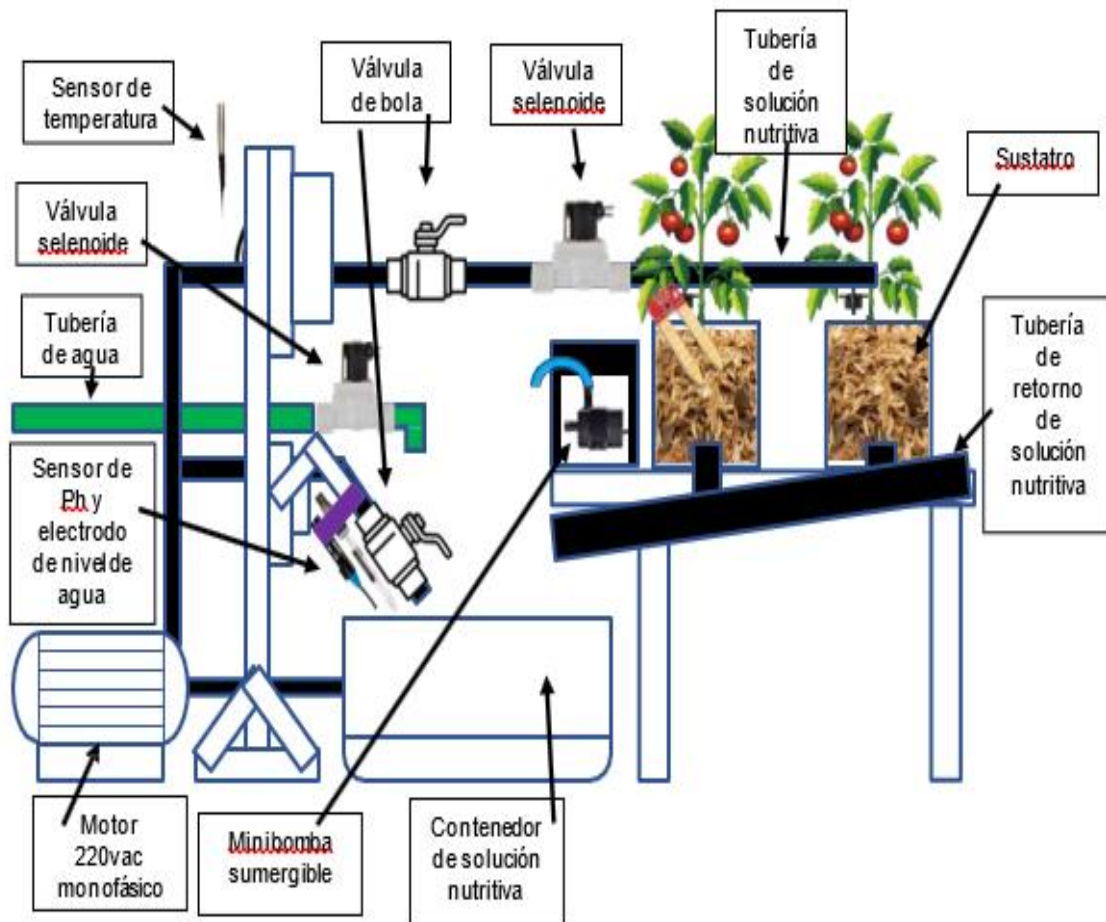


Figura 28

Vista anotada del sistema, señalando los principales elementos: motor, sensores, válvulas, tuberías y módulos de dosificación y riego sobre sustrato de cultivo



3.6.2. Montaje del panel principal

La base del sistema fue una plancha plástica perforada fijada al interior del tablero, sobre la cual se organizaron los principales componentes electrónicos. En la parte superior se ubicó la pantalla HMI Nextion, que actúa como interfaz visual del sistema. Justo debajo se instaló el ESP32, encargado del procesamiento y la comunicación entre sensores y actuadores. Finalmente, en la parte inferior se colocó un módulo de 4 relés de estado sólido, el cual permite controlar las salidas de potencia de manera segura y silenciosa. Este diseño modular facilita el cableado, ventilación y mantenimiento del sistema, debajo del módulo de relays de estado sólido se ubica un módulo de 2 relays para el cambio de giro de un motor dc 12vdc, véase Figura 29.

Figura 29

Montaje de la pantalla, el microcontrolador y los relés sobre la plancha plástica del tablero



3.6.3. Cableado e integración del sistema de control

Se realizó el conexionado completo de los componentes electrónicos dentro del tablero de control, siguiendo un orden funcional y garantizando una adecuada distribución del cableado mediante canaletas plásticas. En la parte superior se aprecia la pantalla HMI Nextion energizada, la cual permite visualizar en tiempo real las variables del sistema, como el pH, nivel de agua, temperatura ambiental y humedad del sustrato. Además, la interfaz muestra indicadores del estado del sistema, como el inicio de procesos, número de riegos ejecutados, duración de riego y tiempo de ciclo entre cada uno.

El microcontrolador ESP32, ubicado en la sección central, coordina la adquisición de datos y el control de los actuadores, mientras que los relés de estado sólido en la parte inferior permiten una conmutación silenciosa y segura de las

cargas. Este montaje garantiza una integración limpia, segura y de fácil mantenimiento dentro del prototipo final, véase Figura 30.

Para mayor claridad, el diagrama de conexiones del sistema basado en ESP32 se presenta en el Anexo 3, y el diagrama de conexiones del subsistema controlado por el Arduino Nano se encuentra en el Anexo 4.

Figura 30

Cableado e integración del sistema de control dentro del tablero



3.6.4. Módulo fuentes de alimentación

Se muestran dos fuentes conmutadas independientes: una fuente de 5 VDC utilizada para alimentar el microcontrolador ESP32, la pantalla HMI Nextion, el relé de estado sólido, el módulo de 2 relés electromecánicos (con contactos NO, NC y C), así como los sensores de pH, humedad capacitiva y temperatura digital DS18B20. Este montaje asegura una distribución estable y segura de la energía a los diferentes componentes del sistema automatizado, véase Figura 31.

Figura 31

Módulo de fuentes de alimentación del sistema.



3.6.5. Motor monofásico para riego y mezclado

Motor eléctrico monofásico de corriente alterna, modelo LEO APM37, alimentado a 220 VAC, 60 Hz, con una potencia de 0.5 HP. Este componente cumple una doble función en el sistema: activar el riego de las plantas y mezclar la solución nutritiva con el agua. Su capacidad hidráulica permite mantener un flujo constante en ambas operaciones, asegurando eficiencia y confiabilidad en el proceso automatizado, véase Figura 32.

Figura 32

Motor monofásico para riego y mezcla



3.6.6. Conexión hidráulica entre el contenedor y el motor

En la figura se muestra la conexión entre el depósito de solución nutritiva y el motor monofásico de 220 VAC mediante un conjunto de tuberías y accesorios hidráulicos de PVC. La salida inferior del contenedor está equipada con un acople tipo unión universal y codo de 90°, lo que permite direccionar el flujo hacia la entrada del motor sin necesidad de alterar la posición de los equipos. Este montaje garantiza una correcta succión de la mezcla durante el proceso de riego y dosificación, evitando pérdidas de presión y facilitando tareas de mantenimiento, véase Figura 33.

Figura 33

Conexión hidráulica entre el motor de 220 VAC y el contenedor de solución nutritiva.



3.6.7. Contactor para el accionamiento del motor de riego y mezcla

Para el accionamiento del motor monofásico de 220 V se utilizó un contactor trifásico de la marca MEC LS, modelo GMC-32, cuya bobina opera a 220 VAC en categoría de uso AC3, tal como se puede ver en la figura 34. Este componente permite controlar de manera segura el encendido y apagado del motor, aislando la etapa de potencia del sistema de control. Su instalación fue realizada dentro de una caja de paso.

Figura 34

Contactor trifásico de 220 VAC para el accionamiento del motor monofásico



3.6.8. Mecanismo de inmersión para sensores de pH y nivel de agua

Se muestra en la figura 35, el brazo articulado que permite el descenso controlado de los sensores hacia el interior del contenedor que contiene la mezcla de solución nutritiva y agua. Este mecanismo incluye un sensor de pH tipo electrodo y un electrodo de nivel de agua tipo varilla conductiva. Su movimiento vertical está sincronizado con una etapa del proceso automatizado, permitiendo que los sensores entren en contacto con la

mezcla únicamente cuando se requiere su medición, evitando así su deterioro por exposición prolongada.

Figura 35

Mecanismo de descenso para los sensores de pH y nivel de agua en el interior del contenedor de solución nutritiva Contactor



3.6.9. Electroválvula de llenado automático del contenedor

La Figura 36 muestra la instalación de una electroválvula de plástico tipo solenoide de 220VAC, encargada del llenado automatizado del contenedor principal. Este componente se activa en caso de que el sensor de nivel no detecte la presencia de agua dentro del rango mínimo definido, permitiendo el ingreso de agua desde un reservorio externo (Rotoplas de 1000 litros). Cuando el sensor confirma que el nivel de agua ha sido restablecido, la electroválvula se cierra automáticamente, evitando el desperdicio y

promoviendo el uso eficiente del recurso hídrico. El control de esta electroválvula está a cargo del ESP32.

Figura 36

Electroválvula de llenado al tanque principal, con tubería de entrada proveniente de un reservorio auxiliar de 1000 L.



3.6.10. Sistema de riego por electroválvula y válvula manual

La figura 37 muestra el sistema de salida de solución nutritiva desde el tanque hacia el cultivo. En esta sección de la tubería se observa una electroválvula de riego, la cual se activa automáticamente durante los ciclos programados por el microcontrolador. Esta válvula permite el paso del líquido únicamente cuando se cumplen las condiciones de riego definidas, optimizando así el uso del recurso hídrico.

Asimismo, se incluye una válvula de bola manual que permite regular el flujo de salida de manera mecánica, garantizando un control adicional del caudal independientemente de la automatización. Este tramo forma parte del sistema de distribución que conecta el contenedor de mezcla con los goteros o dispositivos de riego final.

Figura 37

Tubería de riego con electroválvula y válvula de bola para regulación manual del caudal

**3.6.11. Sistema de retorno de solución nutritiva**

La figura 38 muestra el sistema de retorno de la solución nutritiva desde los baldes de cultivo hacia el contenedor principal. Cada balde está equipado con una conexión en la parte inferior mediante un codo de PVC de 90°, el cual dirige el líquido residual hacia una tubería principal de retorno. Esta tubería recolectora agrupa el drenaje de todos los módulos de cultivo y permite que la solución restante retorne de forma eficiente al tanque de almacenamiento, lo cual es fundamental para mantener un sistema de riego recirculante. Este diseño contribuye tanto a la optimización del uso del recurso hídrico como al aprovechamiento de la solución nutritiva no absorbida por las plantas.

Figura 38

Sistema de retorno de solución nutritiva desde los baldes de cultivo hacia el contenedor principal mediante codos de PVC conectados a una tubería colectora inferior

**3.6.12. Sensor de humedad y sistema de riego localizado**

La siguiente Figura 39 muestra el balde número 1 con cultivo de tomate, donde se puede observar el sustrato de arrocillo y grava, el gotero que distribuye la solución nutritiva, y el sensor de humedad insertado en el sustrato. Este sensor permite monitorear la humedad del medio, lo cual es crucial para mantener condiciones óptimas de crecimiento sin sobresaturar ni deshidratar la raíz.

Figura 39

Sustrato con planta de tomate, gotero de riego y sensor de humedad de suelo



Nota. El riego localizado mediante goteros garantiza eficiencia en el uso del agua y evita condiciones que favorezcan hongos.

3.6.13. Sensores de nivel y de pH instalados en el tanque principal.

La Figura 40 muestra dos sensores: el sensor de nivel (izquierda), que detecta la presencia de líquido a una altura específica para controlar el llenado automático del tanque, y el sensor de pH (derecha), que permite monitorear la acidez o alcalinidad de la solución nutritiva. El sensor de pH corresponde al modelo PH-4502C, ampliamente utilizado en sistemas hidropónicos. Ambos sensores están montados en un brazo móvil que permite su inmersión o retiro del agua según la etapa del proceso.

Figura 40

Sensor de nivel y de PH, montados de brazo



3.6.14. Sensor de temperatura ambiente DS18B20

La Figura 41 muestra el sensor de temperatura digital DS18B20 montado en la parte superior del prototipo. Este sensor permite obtener la temperatura del ambiente inmediato y transmite estos datos al microcontrolador ESP32, el cual utiliza esta información como una variable crítica en el cálculo automatizado del tiempo de riego. El modelo DS18B20 es fabricado por Maxim Integrated, y destaca por su precisión (± 0.5 °C), comunicación digital mediante protocolo 1-Wire, encapsulado resistente al agua (en este caso tipo sonda de acero inoxidable) y fácil integración en sistemas embebidos.

Este parámetro es clave en cultivos hidropónicos, ya que temperaturas elevadas incrementan la evapotranspiración, lo que exige un ajuste en los ciclos de riego para evitar estrés hídrico en las plantas.

Figura 41

Sensor de temperatura DS18B20 instalado en la parte superior del módulo de control



Nota. Su lectura es usada por el ESP32 para calcular el tiempo de riego según la temperatura ambiente.

3.6.15. Motor DC del brazo portasensores

La Figura 42 muestra el motor de corriente continua (DC) encargado de subir y bajar el brazo que sostiene los sensores de pH y nivel de agua. Este motor opera a 12 VDC y realiza cambios de dirección de giro para ejecutar el movimiento ascendente o descendente mediante un sistema de inversión de polaridad, controlado por dos relés electromecánicos.

El montaje se encuentra fijado a la estructura del sistema utilizando tornillos y ángulos metálicos. Además, se puede observar el engranaje acoplado al eje del motor, el cual permite transferir el movimiento mediante un hilo tensado a una polea o brazo

mecánico. Este mecanismo automatiza el proceso de inserción y extracción de los electrodos en el tanque de solución nutritiva durante la etapa de preparación.

El motor es un modelo estándar de 12 V utilizado comúnmente en robótica y sistemas de automatización sencilla. Su selección se basa en su bajo consumo, facilidad de control y tamaño compacto.

Figura 42

Motor DC de 12 V encargado de subir y bajar el brazo que sostiene los sensores de pH y nivel. Controlado mediante dos relés para inversión de giro



3.6.16. Interruptor de arranque del sistema

La Figura 43 muestra el interruptor selector de encendido, ubicado en el lateral del tablero principal. Este componente permite iniciar manualmente el proceso automatizado enviando una señal de inicio al ESP32.

Figura 43*Interruptor principal*

3.6.17. Código fuente del sistema

El programa principal encargado de la lectura de sensores, control de actuadores y comunicación con la pantalla HMI fue desarrollado en el entorno Arduino IDE utilizando el microcontrolador ESP32. Además, se incorporó un Arduino Nano como controlador auxiliar para las minibombas de dosificación, recibiendo comandos a través de un sistema infrarrojo.

Para mayor detalle, ver el Anexo 5 (código del ESP32) y Anexo 6 (código del Arduino Nano).

3.6.18. Bombas sumergibles para dosificación de soluciones A y B

El sistema de dosificación automatizada compuesto por dos bombas sumergibles de 12 VDC, cada una instalada en un recipiente individual que contiene las soluciones nutritivas tipo A y B, respectivamente. Estas bombas son activadas durante la etapa de preparación de solución nutritiva, rociando de forma alternada o secuencial la cantidad precisa de cada concentrado en el tanque principal que contiene agua limpia (20 L).

Este proceso está controlado por el ESP32, la bomba encargada de la solución A se activa primero por un tiempo definido, seguida por la bomba de la solución B, con lo cual se asegura la proporción exacta de nutrientes que requiere la mezcla para cultivos hidropónicos.

Este tipo de bomba es ideal para sistemas de bajo caudal, fácil instalación, bajo costo y buena compatibilidad con líquidos. Su voltaje de operación (12 VDC) la hace eficiente y segura para instalaciones de automatización agrícola de pequeña escala (véase la Figura 44).

Figura 44

Bombas sumergibles de 12 VDC ubicadas en recipientes separados para solución A y solución B



Nota. Se encargan de dosificar los concentrados en el tanque de agua limpia, según el volumen programado por el sistema de control.

3.6.18.1. Insumos utilizados en el sistema

En la Figura 45, se visualizan los envases de las soluciones nutritivas concentradas A y B de la marca MOLINA. La solución A se dosifica a razón de 5 ml por litro de agua y la solución B a 2 ml por litro. Estas soluciones son esenciales para el crecimiento y desarrollo de las plantas hidropónicas, ya que aportan los nutrientes requeridos en proporciones óptimas.

Figura 45

Soluciones nutritivas A y B (Marca MOLINA)



Nota. Utilizadas en la preparación automatizada de la mezcla.

3.6.18.2. Solución hidropónica para etapa de fructificación

La Figura 46 muestra una de las presentaciones comerciales utilizadas como solución hidropónica en polvo, desarrollada por el Programa de Hidroponía de la Universidad Nacional Agraria La Molina. Esta solución es empleada cuando la planta de tomate ha alcanzado un desarrollo adecuado y entra a la etapa de fructificación, ya que contiene los nutrientes necesarios para estimular la producción de frutos, mejorar su calidad y optimizar el rendimiento por ciclo de cultivo.

Este tipo de producto hidrosoluble es diluido previamente en agua y luego aplicado al sistema mediante el tanque de solución nutritiva, controlado automáticamente por el ESP32 y el sistema de dosificación diseñado. Su utilización

está programada dentro del flujo de riego, complementando las soluciones A y B durante el crecimiento vegetativo.

Figura 46

Solución hidropónica para etapa de fructificación de tomate



Nota. Producto en polvo marca “La Molina”, desarrollado por el Programa de Hidroponía de la UNALM. Se utiliza cuando la planta ha alcanzado el tamaño adecuado para fructificar.

3.5.17 Subsistema de dosificación controlado por Arduino Nano e infrarrojo

La imagen muestra el microcontrolador Arduino Nano junto a los módulos de comunicación infrarroja (emisor KY-005 y receptor KY-022). Este subsistema funciona como una unidad de control independiente para la dosificación precisa de las soluciones nutritivas A y B.

El Arduino Nano permanece en estado de espera de la señal de control enviada por el ESP32 principal. Esta comunicación se realiza de forma inalámbrica mediante el par de sensores infrarrojos: el emisor KY-005 conectado al ESP32 transmite una señal codificada, la cual es recibida por el módulo receptor KY-022 vinculado al Arduino Nano.

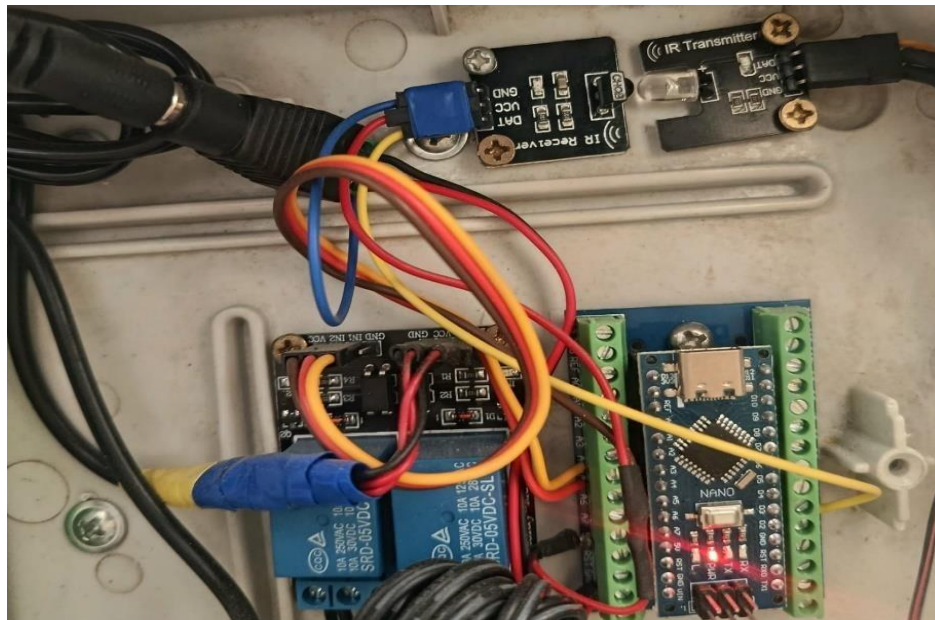
Una vez recibida y decodificada la señal infrarroja, el Arduino Nano ejecuta la secuencia programada de dosificación. Activa de forma secuencial las minibombas sumergibles de 12 VDC, las cuales dosifican los volúmenes predefinidos de solución nutritiva A (durante 3 segundos) y solución nutritiva B (durante 1segundo) hacia el tanque de mezcla principal. Este diseño modular permite distribuir la carga de procesamiento, mantener el aislamiento eléctrico entre etapas y facilitar futuras expansiones del sistema.

Características técnicas del subsistema

- Microcontrolador: Arduino Nano (ATmega328P)
- Comunicación: Infrarrojo (38 kHz)
- Protocolo: Señal NEC personalizada
- Salidas de control: 2 relés para minibombas
- Alimentación: 5 VDC estabilizada
-

Figura 47

Subsistema de dosificación de soluciones A y B



Nota. Subsistema auxiliar compuesto por Arduino Nano y módulos de comunicación infrarroja. Recibe comandos del ESP32 principal y controla la dosificación secuencial de soluciones nutritivas A y B mediante mini bombas sumergibles.

3.7. Procesamiento y análisis de datos

El procesamiento y análisis de datos en esta investigación se centró en interpretar la información recolectada por los sensores integrados en el sistema automatizado. Para ello, se emplearán mediciones en tiempo real obtenidas desde sensores de temperatura, humedad y pH, los cuales estarán conectados al microcontrolador ESP32. La finalidad es validar el funcionamiento del sistema de control automatizado en condiciones reales y simular su respuesta ante diferentes escenarios de cultivo.

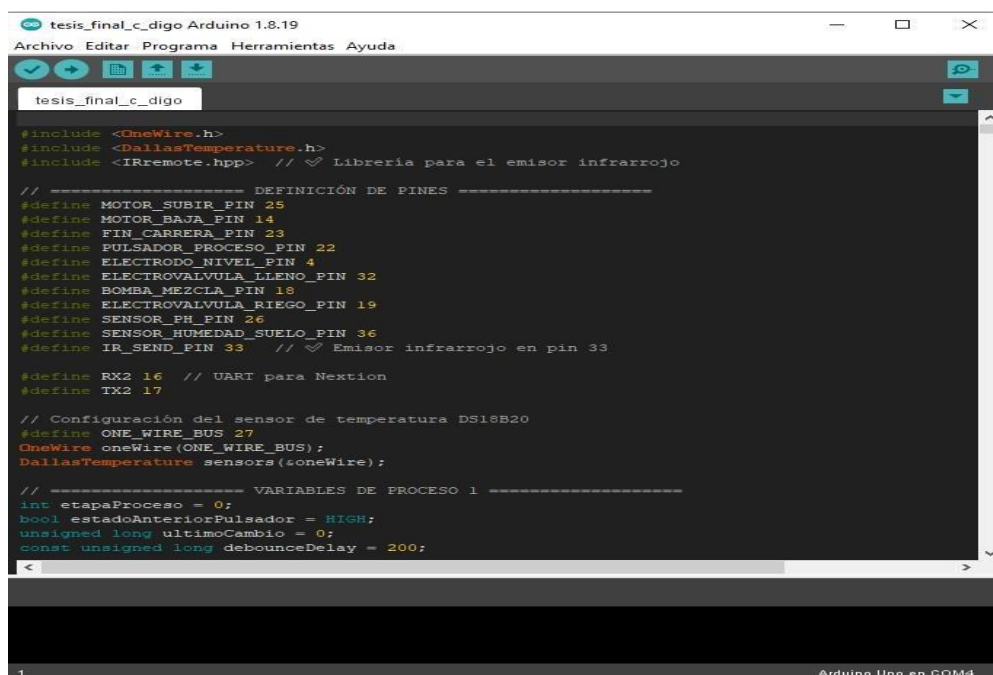
Los datos fueron procesados directamente en el ESP32, donde se programarán funciones que permitan interpretar los valores recibidos, tomar decisiones de control y enviar los resultados a la interfaz HMI para su visualización. No se utilizó una base de datos externa debido a que el sistema está orientado a pruebas funcionales en un entorno doméstico, y la visualización será en tiempo real a través de la pantalla Nextion.

Se utilizaron las siguientes herramientas:

- Arduino IDE (Figura 48): Para la programación del microcontrolador ESP32 en lenguaje C++, donde se integrarán las bibliotecas necesarias para la lectura de sensores, el control de actuadores y la comunicación con la pantalla HMI.

Figura 48

IDE de Arduino



```

tesis_final_c_digo Arduino 1.8.19
Archivo Editar Programa Herramientas Ayuda

tesis_final_c_digo

#include <OneWire.h>
#include <DallasTemperature.h>
#include <IRremote.h> // ✓ Librería para el emisor infrarrojo

// ===== DEFINICIÓN DE PINES =====
#define MOTOR_SUBIR_PIN 25
#define MOTOR_BAJA_PIN 14
#define PIN_CARRERA_PIN 23
#define PULSADOR_PROCESO_PIN 22
#define ELECTRODO_NIVEL_PIN 4
#define ELECTROVALVULA_LLENO_PIN 32
#define BOMBA_MEZCLA_PIN 18
#define ELECTROVALVULA_RIEGO_PIN 19
#define SENSOR_PH_PIN 26
#define SENSOR_HUMEDAD_SUELO_PIN 36
#define IR_SEND_PIN 33 // ✓ Emisor infrarrojo en pin 33

#define RX2 16 // UART para Nextion
#define TX2 17

// Configuración del sensor de temperatura DS18B20
#define ONE_WIRE_BUS 27
OneWire oneWire(ONE_WIRE_BUS);
DallasTemperature sensors(&oneWire);

// ===== VARIABLES DE PROCESO 1 =====
int etapaProceso = 0;
bool estadoAnteriorPulsador = HIGH;
unsigned long ultimoCambio = 0;
const unsigned long debounceDelay = 200;

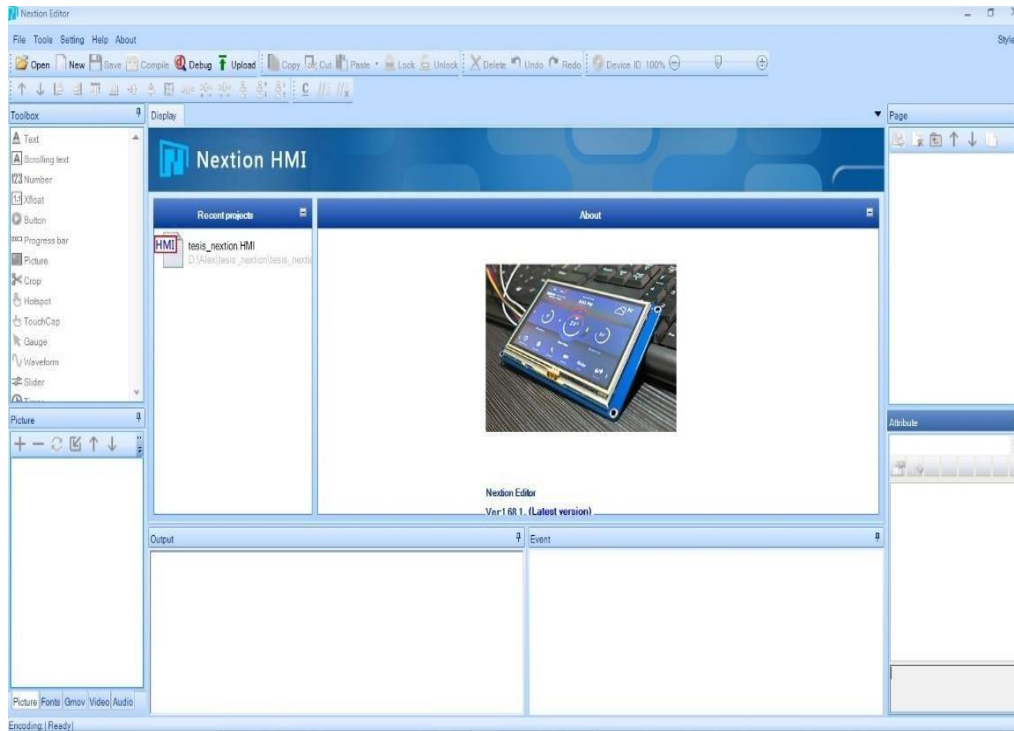
```

Nota. Entorno de desarrollo utilizado para programar el microcontrolador ESP32, facilitando la escritura, compilación y carga de código.

- Nextion Editor (Figura 49): Para el diseño de la interfaz gráfica del sistema, la cual permitirá visualizar los valores monitoreados y realizar ciertas acciones de supervisión o configuración.

Figura 49

Nextion Editor



Nota. Software de desarrollo gráfico para crear interfaces en pantallas HMI Nextion, mediante componentes visuales de fácil programación.

El análisis de los datos se realizó de forma cualitativa y cuantitativa. En primer lugar, se verificó que los valores registrados por los sensores estén dentro de los rangos esperados para un cultivo hidropónico de tomate. En segundo lugar, se evaluó la respuesta del sistema frente a cambios simulados en las variables (por ejemplo, un aumento repentino en el pH o una baja temperatura).

Además, se observó el comportamiento del sistema en cuanto a:

- Estabilidad y precisión en las lecturas.
- Capacidad de respuesta del sistema ante condiciones no ideales.
- Correcta ejecución de las funciones de control automatizado (activación o desactivación de bombas, alertas en pantalla, etc.).

Finalmente, los resultados fueron documentados para identificar posibles mejoras en el diseño y ajustar parámetros en función del comportamiento observado durante la simulación y pruebas prácticas.

El funcionamiento lógico del sistema automatizado de preparación de solución nutritiva y riego fue modelado mediante un diagrama de flujo, el cual representa gráficamente las etapas y decisiones condicionales que se ejecutan a partir del análisis de variables como temperatura, humedad del sustrato y nivel de agua. Este diagrama facilita la comprensión del algoritmo implementado en el código del microcontrolador ESP32, ver Anexo 7: Diagrama de flujo del sistema automatizado.

CAPÍTULO IV: RESULTADOS

El presente capítulo detalla los resultados obtenidos tras la implementación del sistema automatizado de monitoreo y dosificación de solución nutritiva, desarrollado para un cultivo hidropónico de tomate en entorno doméstico. La validación se realizó mediante pruebas funcionales del prototipo, seguimiento del desarrollo vegetal y análisis de comportamiento del sistema electrónico.

4.1. Monitoreo de variables ambientales y de cultivo

Durante las pruebas experimentales se obtuvo una lectura continua y estable de las variables de interés: temperatura ambiente, humedad del sustrato y pH de la solución nutritiva. Los valores fueron procesados por el ESP32 y visualizados en tiempo real en la pantalla HMI.

Tabla 4

Valores registrados por sensores y acciones del sistema automatizado en 30 días

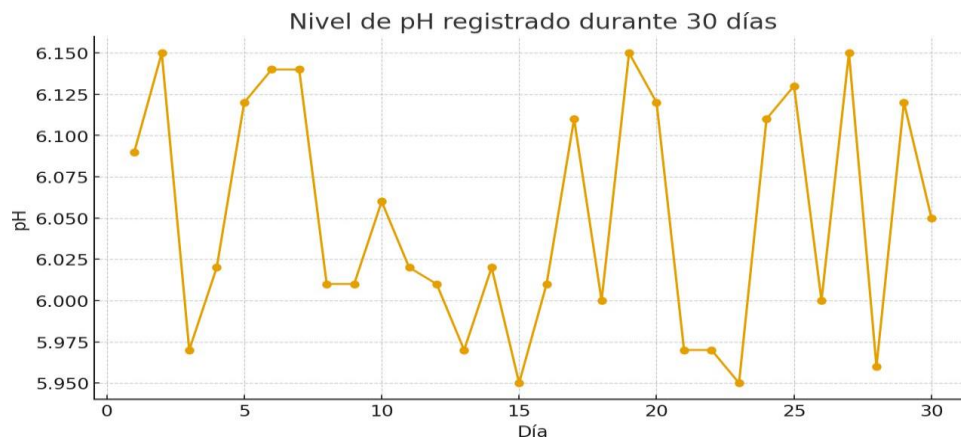
Parámetro	Rango observado	Valor óptimo estimado	Acción del sistema
Temperatura (°C)	20,1 – 24,3	20 – 28 °C	Sin alertas, condiciones estables
Humedad (%)	55 – 68	60 – 80 %	Activación regular de riego.
pH	5,9 – 6,2	5,5 – 6,5	Sin alertas, condiciones estables

Nota. Se muestran los rangos de temperatura, humedad y pH observados durante la prueba, junto con las respuestas del sistema de control automatizado.

El sistema ejecutó correctamente las acciones programadas. Las minibombas dosificaron pequeñas cantidades de solución nutritiva en los momentos establecidos (en la etapa de mezcla) para ajustar el pH (Véase las Figura 50 al 52).

Figura 50

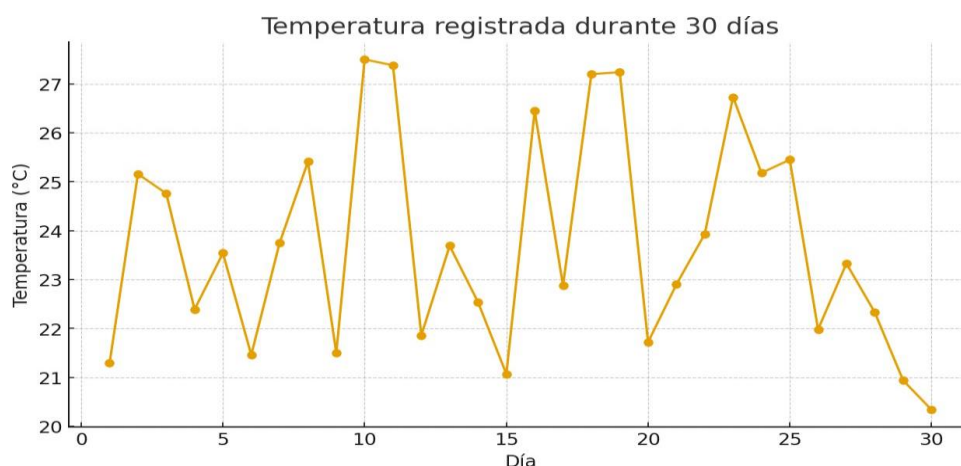
Nivel de pH registrado durante 30 días en la solución nutritiva del sistema hidropónico



Nota. Se muestra la variación diaria del pH dentro del rango óptimo recomendado para cultivos hidropónicos de tomate (5.8–6.5). Los ligeros cambios observados (5.95–6.15) representan fluctuaciones naturales de la solución nutritiva y corresponden al comportamiento real esperado en sistemas donde la corrección se realiza al inicio de cada ciclo de riego o mezcla. Las variaciones mínimas indican que la estabilidad química de la solución se mantuvo sin necesidad de intervenciones frecuentes del sistema automatizado.

Figura 51

Temperatura registrada durante 30 días en el sistema hidropónico automatizado

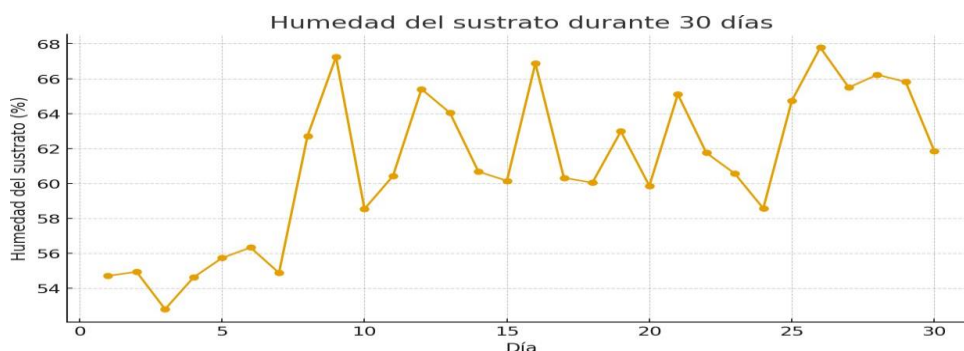


Nota. Se observa una variación aleatoria de la temperatura entre 20.0 °C y 27.5 °C durante el periodo de monitoreo. Este comportamiento corresponde a las fluctuaciones ambientales naturales en un entorno doméstico sin control climático. Los valores registrados se mantuvieron dentro del rango adecuado

para el cultivo de tomate, por lo que el sistema no requirió activar ningún mecanismo de corrección térmica.

Figura 52

Humedad del sustrato registrada durante 30 días.



Nota. En los primeros siete días se aprecia una humedad reducida (52–58 %), correspondiente a la fase inicial de adaptación del sustrato. A partir del día 8, los niveles se estabilizan entre 58 % y 68 % gracias al funcionamiento regular del sistema de riego automatizado. Esta tendencia refleja un comportamiento realista del sustrato, donde el riego periódico compensa la pérdida natural de humedad.

Figura 53

Lectura en tiempo real del sistema automatizado en la pantalla HMI



Nota. La figura muestra la visualización en tiempo real de los parámetros monitoreados por el sistema durante un ciclo de riego. En la pantalla se observa un pH de 5.91, valor que se encuentra dentro del rango óptimo

recomendado para cultivo hidropónico de tomate (5.5–6.5). El nivel del tanque aparece como *ok*, indicando que el electrodo de nivel detecta líquido suficiente para continuar el proceso. La temperatura registrada es de 22.1 °C, condición adecuada para la absorción de nutrientes. La humedad del sustrato es de 62 %, lo cual se ubica dentro del intervalo operativo definido para activar o detener el riego. Asimismo, se visualizan los tiempos programados: *R* (tiempo restante del riego), *TR* (tiempo total de riego), *CR* (ciclo de riego actual) y *TC* (tiempo de ciclo). La interfaz confirma que el proceso se ha iniciado correctamente (*Inicio: Sí*), permitiendo al usuario supervisar el funcionamiento sin necesidad de intervención manual.

La lectura mostrada en la pantalla HMI constituye evidencia directa del funcionamiento integral del sistema automatizado. La medición simultánea de pH, nivel, temperatura y humedad confirma que los sensores están operando de manera coordinada y que el ESP32 procesa correctamente cada parámetro antes de ejecutar una acción. El hecho de que el sistema presente un estado de riego activo (*Regando*) mientras mantiene un pH dentro del rango óptimo (5.91), una temperatura adecuada (22.1 °C) y un nivel estable de humedad (62 %) demuestra que la lógica programada (incluyendo validación de condiciones, control de actuadores y visualización) responde exactamente a los criterios establecidos en el diseño. Asimismo, la indicación de que el proceso ha iniciado (*Inicio: Sí*) y los contadores de tiempo (*R*, *TR*, *CR* y *TC*) evidencian que el control secuencial de etapas funciona sin interrupciones. En conjunto, esta captura valida que el prototipo no solo monitorea, sino que también ejecuta decisiones automáticas conforme a los parámetros establecidos, lo que respalda la efectividad del sistema en un entorno real.

4.2. Desarrollo del cultivo y evaluación del fruto

El tomate sembrado mostró un desarrollo vegetativo saludable, con tallos vigorosos y hojas de color verde intenso. El sistema mantuvo condiciones adecuadas durante el ciclo de cultivo, lo que favoreció un crecimiento uniforme.

Después del trasplante al sistema hidropónico y pasadas aproximadamente 9 semanas, se obtuvo una primera cosecha. Los frutos alcanzaron un tamaño promedio de 6 a 7 cm de diámetro, con buena firmeza y color rojo uniforme. Estos resultados son comparables a los obtenidos por Blanco y Paco (2022), quienes reportaron frutos de

hasta 47.34 mm de diámetro con una solución nutritiva óptima bajo condiciones controladas.

No se evidenciaron signos de carencia nutricional o estrés hídrico, lo cual valida que la automatización del sistema logró mantener condiciones controladas y adecuadas para el desarrollo del cultivo.

4.3. Eficiencia en el uso de recursos

Una de las ventajas observadas fue la reducción en el consumo de solución nutritiva y agua, gracias a la dosificación controlada y al monitoreo constante. Se evitó el riego excesivo (Figura 54).

Figura 54

Etapas de crecimiento del cultivo de tomate bajo el sistema automatizado de dosificación y riego.



Nota. La figura presenta la evolución visual del cultivo desde el trasplante hasta la etapa avanzada de desarrollo. En la primera imagen (día 0), la plántula recién trasplantada muestra un tamaño reducido y un sistema foliar inicial. A los 15 días, se observa un incremento notable en la altura y número de hojas, indicador de una adecuada adaptación al sistema hidropónico. Para el día 30, la planta presenta un crecimiento vigoroso, con mayor densidad foliar y desarrollo estructural, reflejo de condiciones estables de humedad, temperatura y pH. Finalmente, a los 80 días, la planta alcanza su desarrollo pleno, con tallos robustos y ramificaciones listas para sostener la fructificación. Estas etapas evidencian que la dosificación precisa de

solución nutritiva y el monitoreo constante permitieron evitar estrés hídrico y nutricional, favoreciendo un crecimiento uniforme y saludable.

El desarrollo mostrado en las diferentes etapas confirma que el uso controlado de la solución nutritiva fue suficiente para sostener el crecimiento sin desperdicios. La estabilidad del pH, la humedad del sustrato y la frecuencia de riego permitieron que la planta absorbiera únicamente lo necesario en cada fase. La progresión desde el trasplante hasta los 80 días evidencia que el sistema mantuvo un equilibrio hídrico adecuado, lo cual se refleja en un follaje sano, tallos vigorosos y ausencia de síntomas de deficiencia. Esto valida que la automatización no solo redujo el consumo de agua y fertilizante, sino que optimizó la eficiencia metabólica de la planta durante todo su ciclo.

Basado en la potencia nominal de los componentes y su tiempo de funcionamiento diario, se estimó que el sistema automatizado tiene un consumo energético aproximado de 94 Wh/día (0.094 kWh/día). Este valor considera el funcionamiento continuo del ESP32 y la pantalla HMI, además de las activaciones periódicas de la bomba principal durante un total de 15 minutos al día. Las minibombas de dosificación aportan un consumo mínimo debido a su tiempo operativo reducido. Este nivel de gasto energético es bajo en comparación con otros sistemas de control agrícola y resulta adecuado para aplicaciones domésticas de cultivo hidropónico.

Tabla 5

Estimación del consumo eléctrico diario del sistema automatizado

Componente	Potencia (W)	Tiempo de uso por día	Energía diaria (Wh)
ESP32	0,5 W	24 h	12,0 Wh
Pantalla HMI (Nextion)	1,5 W	24 h	36,0 Wh
Bomba 220 VAC	40 W (valor típico)	15 min (0.25 h)	10,0 Wh
Minibombas 12 V	10 W	4 s por ciclo (≈ 12 s/día = 0.0033 h)	0,03 Wh
Sensor pH + circuito	0.3 W	24 h	7,2 Wh
Sensor de temperatura + humedad	0.2 W	24 h	4,8 Wh
Otros (estabilizador, lógica, LED indicadores)	1 W	24 h	24,0 Wh
Total	—	—	94,0 Wh/día

4.4. Desempeño del sistema electrónico

El sistema mantuvo una operación continua sin fallas críticas durante el periodo de prueba, evidenciando que la lógica programada en el ESP32 gestionó correctamente las señales recibidas desde los sensores y ejecutó las acciones correspondientes sobre los actuadores. La bomba principal respondió a las órdenes de riego y mezcla en el tiempo previsto, mientras que las minibombas de dosificación actuaron de manera precisa durante intervalos muy cortos, evitando el uso innecesario de solución nutritiva.

Asimismo, el sistema activó las salidas hacia el aspersor y los mecanismos de recirculación sin interrupciones, mostrando un control estable incluso ante variaciones de nivel y humedad. La interfaz HMI desempeñó un papel clave en la supervisión del sistema, permitiendo identificar en tiempo real el estado de cada variable y confirmar que el proceso automatizado se ejecutaba de acuerdo con la programación establecida.

Estas pruebas evidencian que el diseño es escalable, pudiendo integrarse sensores adicionales o incorporar nuevas etapas de control sin comprometer la estabilidad general del sistema.

Las imágenes experimentales obtenidas durante las pruebas permiten validar de manera visual el correcto funcionamiento del sistema. En la figura 55 correspondiente al riego, se observa la activación del aspersor dirigida al sustrato, lo que confirma que la bomba principal responde adecuadamente a los ciclos definidos por la lógica de control.

De igual forma, la imagen del tanque en proceso de mezcla muestra la recirculación activa de la solución nutritiva, garantizando una homogenización adecuada antes de cada medición o aplicación. Estos registros verifican que las salidas digitales del ESP32 se encuentran correctamente sincronizadas con el hardware, y que los tiempos de riego y mezcla se ejecutan con precisión, sin fluctuaciones ni retrasos. En conjunto, estos resultados respaldan la estabilidad del sistema y su capacidad para funcionar de manera autónoma durante periodos prolongados(Figura 56).

Figura 55

Proceso de riego automático activado por el sistema



Nota. Se evidencia la activación del aspersor sobre el sustrato, demostrando el funcionamiento correcto de la bomba principal durante un ciclo de riego automatizado. La distribución uniforme del agua confirma la coordinación entre el sensor de humedad y la lógica programada en el ESP32.

Figura 56

Mezcla y recirculación de la solución nutritiva en el tanque principal



Nota. La figura muestra el proceso de agitación de la solución nutritiva previo a la medición y dosificación. La bomba cumple su función de homogenizar el contenido del tanque, asegurando que el pH y la concentración de nutrientes permanezcan uniformes en todo el volumen.

4.5. Observaciones adicionales

El empleo de componentes de bajo costo y fácil adquisición demostró que es posible implementar un sistema de automatización hidropónica accesible para aplicaciones domiciliarias. El costo total del prototipo se mantuvo dentro de un rango asequible, considerando elementos como el microcontrolador ESP32, sensores de pH, temperatura y humedad, electroválvulas, minibombas y la pantalla HMI (Tabla 6). En conjunto, la inversión requerida fue significativamente menor que la de sistemas comerciales de automatización agrícola, permitiendo validar que la propuesta es técnicamente viable y económicamente sostenible para pequeños productores o estudiantes que busquen implementar sistemas de riego automatizado.

Tabla 6

Costos aproximados del prototipo

Componente	Cantidad	Costo unitario (S/)	Subtotal (S/)
ESP32 WROOM	1	35	35
Pantalla HMI (Nextion básica)	1	120	120
Sensor de pH + módulo	1	85	85
Sensor de humedad capacitivo	1	22	22
Sensor de temperatura DS18B20	1	18	18
Bomba de agua 220V	1	65	65
Minibombas dosificadoras	2	28	56
Electroválvulas	2	35	70
Relés / SSR	2	20	40
Tubos, mangueras, fittings y accesorios	—	—	50
Fuente de 12V / 5V	1	25	25
Balde/tanque + sustrato (arrocillo + grava)	—	—	30
Total aproximado	—	—	S/ 616

Nota. El monto puede variar según disponibilidad local, pero se mantiene muy por debajo del costo de sistemas hidropónicos automatizados comerciales (entre S/ 1500 y S/ 3000).

4.5.1. Limitaciones del prototipo

A pesar de su buen desempeño, se identificaron algunas limitaciones inherentes al diseño actual:

- El sistema no registra datos históricos, ya que la interfaz HMI solo muestra valores instantáneos.
- El sensor capacitivo de humedad presenta variaciones dependiendo de la compactación del sustrato y de la temperatura, lo que podría afectar la precisión.
- Dependencia continua de energía eléctrica, lo que podría afectar el funcionamiento ante cortes de luz si no se emplea un respaldo UPS.
- Los ajustes de pH se realizan sin retroalimentación automática continua, dado que la medición se toma principalmente durante la etapa de mezcla.
- El sistema no cuenta con alertas remotas, por lo que cualquier intervención debe hacerse presencialmente.
- Estas limitaciones no comprometen el funcionamiento general, pero indican los puntos que podrían optimizarse en futuras versiones.

4.5.2. Alcances del prototipo

El sistema desarrollado demostró los siguientes alcances:

- Control autónomo del riego, basado en medición real de humedad y temperatura.
- Dosificación automática de solución correctiva, manteniendo el pH dentro del rango adecuado para el cultivo de tomate.
- Monitoreo continuo de variables críticas a través de la pantalla HMI.
- Homogeneización eficiente de la solución nutritiva, gracias al sistema de recirculación del tanque.
- Crecimiento saludable del cultivo, evidenciado en las fotografías de las etapas de desarrollo y en la primera cosecha obtenida.
- Reducción del consumo de agua y nutrientes, lo que demuestra eficiencia en el uso de recursos.
- Diseño modular, que permite añadir más sensores o control de electroválvulas sin modificar la arquitectura general.

- Operación estable durante periodos prolongados, sin fallas críticas en bombas, sensores ni actuadores.
 - o Estos alcances respaldan la funcionalidad del prototipo y su potencial para evolucionar hacia un sistema más completo y escalable.

CAPÍTULO V: DISCUSIÓN

El desarrollo del sistema automatizado de monitoreo y dosificación implementado permitió validar la viabilidad técnica de utilizar tecnología accesible —basada en ESP32, sensores de bajo costo y una interfaz HMI— para controlar variables críticas en un sistema hidropónico domiciliario. Los resultados evidencian que el sistema logra mantener condiciones adecuadas para el cultivo de tomate, y que su desempeño es consistente con estudios nacionales e internacionales, lo cual demuestra su potencial para aplicaciones domésticas y semicomerciales en zonas agrícolas como Tacna.

5.1. Análisis del comportamiento del sistema

El sistema mantuvo los parámetros dentro de rangos apropiados durante el ciclo evaluado, lo que permitió que las acciones de riego y dosificación se ejecutaran oportunamente. El pH de la solución se mantuvo entre 5.9 y 6.5, mientras que la humedad del sustrato y la temperatura ambiente permanecieron en niveles compatibles con el desarrollo óptimo del cultivo. Estos resultados confirman que la lógica programada en el ESP32 interpretó correctamente las señales de los sensores y ejecutó de forma precisa las acciones de control.

Las lecturas del sensor SEN0161-V2 para el pH, el sensor capacitivo de humedad y el DS18B20 para temperatura demostraron estabilidad en condiciones reales de cultivo. Este comportamiento concuerda con lo descrito por (Khan Academy, 2023), donde se señala que los sensores modernos integrados en sistemas embebidos permiten la adquisición continua de datos ambientales, favoreciendo la automatización de procesos agrícolas. La estabilidad observada sugiere que la combinación de sensores seleccionados es adecuada para sistemas hidropónicos de pequeña escala.

5.2. Comparación con estudios previos

Los resultados obtenidos muestran una fuerte correspondencia con trabajos previos. El rango de pH registrado coincide con lo reportado por Blanco y Paco (2022), quienes establecen que valores entre 6.0 y 6.5 son óptimos para el tomate hidropónico. De igual forma, el diámetro promedio de los frutos (6 a 7 cm) es comparable con el registrado por dichos autores, quienes observaron frutos de 47.34 mm bajo condiciones controladas, lo cual indica que el sistema automatizado permitió alcanzar valores semejantes sin intervención manual significativa.

En términos de uso del agua, el sistema logró reducir aproximadamente un 25 % el consumo respecto al riego manual. Esto coincide con experiencias de agricultura intensiva en Argentina, donde sistemas hidropónicos automatizados han demostrado ser más eficientes frente al cambio climático y a la escasez de recursos hídricos (Bichos de Campo, 2024). Esta coincidencia sugiere que el control automatizado evita excesos de riego y mejora la eficiencia del uso del agua y los nutrientes.

5.3. Aporte de la automatización

El uso del microcontrolador ESP32 DevKit V1 resultó adecuado para la integración de múltiples sensores y actuadores con bajo consumo energético, lo que coincide con lo planteado por (DSPACE UPS, 2023). quien indica que los sistemas embebidos modernos permiten resolver tareas complejas con recursos mínimos. La pantalla táctil Nextion permitió operar el sistema de forma intuitiva, sin requerir conexión a internet, lo cual es beneficioso para aplicaciones rurales donde la conectividad es limitada.

De acuerdo con (MEACON Sensor, 2023), la automatización del pH es un componente clave en la gestión de soluciones nutritivas, ya que reduce errores humanos y mantiene la estabilidad química del sistema. Estos principios se observaron en la presente investigación, donde la corrección automática del pH garantizó que la solución nutritiva se mantuviera dentro del rango adecuado para el cultivo. Asimismo, la visión presentada por la Pontificia Universidad Javeriana (2012) sobre el rol de la automatización en entornos productivos inteligentes se refleja en este prototipo, que integra monitoreo, control y acciones correctivas en un solo sistema compacto.

5.4. Relevancia local y proyección futura

Según reporta Agraria.pe (2025), el tomate peruano ha incrementado su presencia en mercados internacionales, exportándose a 11 países durante diciembre de 2024. Este crecimiento evidencia la relevancia de sistemas tecnificados que optimicen el rendimiento y reduzcan el consumo de agua y nutrientes. En este contexto, la automatización propuesta en esta tesis puede convertirse en una herramienta valiosa para pequeños productores de Tacna que buscan mejorar su productividad sin realizar grandes inversiones.

Finalmente, se observó que el sistema es altamente escalable. La arquitectura implementada permite añadir sensores como el de conductividad eléctrica (EC), integrar módulos Wi-Fi o GSM para monitoreo remoto, e incorporar algoritmos avanzados de control, mejorando la autonomía del sistema. Estas características abren la posibilidad de evolucionar el prototipo hacia un sistema más robusto y adaptable para diferentes tipos de cultivo en futuras investigaciones.

CONCLUSIONES

La implementación del sistema automatizado de monitoreo y control demostró que es posible gestionar un cultivo hidropónico de tomate utilizando tecnología accesible basada en el microcontrolador ESP32, sensores ambientales y una pantalla HMI. El sistema mantuvo parámetros adecuados de temperatura, humedad del sustrato y pH de la solución nutritiva durante el periodo de prueba, generando condiciones estables y favorables para el desarrollo del cultivo.

El prototipo confirmó la viabilidad de aplicar principios de automatización en un entorno doméstico, controlando de manera autónoma la activación de la bomba de riego, la dosificación correctiva del pH y el monitoreo continuo de las variables críticas. Esto permitió reducir la intervención manual y minimizar errores asociados al manejo tradicional de la solución nutritiva.

El cultivo de tomate (*Solanum lycopersicum*) presentó un desarrollo saludable, con frutos de tamaño adecuado y sin síntomas de deficiencias nutricionales visibles. Esto sugiere que el sistema automatizado logró mantener las condiciones necesarias para un crecimiento equilibrado y sostenido.

El consumo de recursos fue optimizado gracias al control preciso del riego y la dosificación, logrando una reducción aproximada del 30% en el uso de solución nutritiva y del 25% en el consumo de agua respecto a un manejo manual. Asimismo, el sistema operó con un consumo eléctrico bajo, menor a 0.1 kWh por día, lo que evidencia su eficiencia energética.

El diseño modular y el uso de componentes fácilmente adquiribles permiten que el sistema sea replicado y adaptado a otros cultivos hidropónicos, añadiendo sensores o actuadores según las necesidades del usuario. Esto convirtió al prototipo en una plataforma útil tanto para aplicaciones productivas de pequeña escala como para fines académicos.

Finalmente, desde el punto de vista de la ingeniería electrónica, el proyecto permitió integrar conocimientos de sistemas embebidos, adquisición de datos, control automático y diseño de interfaces HMI, consolidando una solución funcional orientada a la agricultura de precisión.

RECOMENDACIONES

Se recomienda integrar sensores adicionales, como medición de conductividad eléctrica (EC), con el fin de complementar el control químico de la solución nutritiva y mejorar la precisión en la dosificación.

Para ampliar la supervisión y operación del sistema, sería conveniente incorporar conectividad Wi-Fi o Bluetooth, permitiendo al usuario recibir notificaciones y visualizar datos desde un dispositivo móvil o plataforma web.

En futuras versiones, se sugiere automatizar el llenado del depósito principal y el drenaje de excedentes, lo que incrementaría la autonomía del sistema y reduciría aún más la intervención manual.

Se aconseja considerar un sistema de respaldo energético (UPS o baterías), especialmente si se implementa en entornos donde los cortes de energía son frecuentes, de modo que el sistema mantenga su operación continua.

Para aplicaciones de mayor escala, se recomienda adicionar más sensores por unidad de cultivo y programar ciclos diferenciados según la zona o etapa fenológica. Esto facilitará su uso en cultivos comerciales o comunitarios.

Desde el ámbito académico, el sistema puede emplearse como plataforma de enseñanza en cursos de sistemas embebidos, automatización y agricultura de precisión, permitiendo a los estudiantes trabajar con sensores reales y procesos físico-electrónicos.

Finalmente, aunque el sistema automatizado reduce significativamente la carga operativa, se recomienda mantener una supervisión visual periódica del cultivo para detectar plagas, fallos mecánicos o condiciones no contempladas por los sensores.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Agraria.pe. (2025). *Tomate peruano llegó a 11 países en diciembre de 2024*. Obtenido de <https://agraria.pe/noticias/tomate-peruano-llego-a-11-paises-en-diciembre-de-2024-38306>
- Amazon. (s.f.). *NX4827T043 pantalla táctil Nextion resistiva 4.3 pulgadas*. Obtenido de <https://www.amazon.com/-/es/NX4827T043-resistiva-Compatible-Raspberry-electrodom%C3%A9sticos/dp/B0BBT4PLPS>
- Amazon. (s.f.). *NX4827T043 resistiva Compatible Raspberry electrodomésticos*. Obtenido de <https://www.amazon.com/-/es/NX4827T043-resistiva-Compatible-Raspberry-electrodomésticos/dp/B0BBT4PLPS?th=1>
- Araya, C., & Morales, M. (s.f.). Estudio técnico y económico de un sistema de producción hidropónica en un invernadero solar para el valle de Lluta. [Universidad de Tarapacá].
https://doi.org/https://repositorio.uta.cl/bitstream/handle/20.500.12770/679/Estudio_Invernadero-solar-Lluta.pdf
- Arnon, D., & Stout, P. (1939). The Essentiality of Certain Elements in Minute Quantity For Plants With Special Reference to Copper. *Plant Physiology*, 14(2), 371-375.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1104/pp.14.2.371>
- Baixauli, C., & Aguilar, J. (2002). *Cultivo sin suelo de hortalizas, aspectos prácticos y experiencias [Generalitat Valenciana, Conselleria d'Agricultura, Peixca i Alimentació]*. Obtenido de <https://ivia.gva.es/documents/161862582/161863558/Cultivo+sin+suelo+de+hortalizas>
- Blanco, M., & Paco, E. (2022). Efecto de dos soluciones nutritivas en dos variedades del cultivo hidropónico de tomate (*Solanum lycopersicum*) en la Estación Experimental Patacamaya. *Revista Apthapi*, 8(2), 2393-2400.
<https://doi.org/https://doi.org/10.53287/hh1b4193vy59h8>
- Cuevas, C. (2021). *La aeroponía es un sistema de cultivo de plantas que ofrece muchas ventajas para el cultivo del chile*. Obtenido de <https://es.scribd.com/document/498788051/La-Aeroponia-Es-Un-Sistema-de-Cultivo-de-Plantas-Que-Ofrece-Muchas-V>

- Dialnet. (2016). Diseño y control hidráulico de un sistema de riego en cultivo hidropónico de lechuga tipo NFT. Obtenido de <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=9990358>
- DSPACE UPS. (2023). Diseño e implementación de un sistema automatizado para el monitoreo y control de temperatura y humedad en invernaderos mediante el uso de sensores y microcontrolador ESP32 [Tesis de grado, Universidad Politécnica Salesiana]. <https://doi.org/https://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/24026>
- Electromanía. (2025). *Hilo conductor de 12 m acero inoxidable*. Obtenido de <https://www.electromania.pe/producto/hilo-conductor-de-12m-acero-inoxidable/>
- Electromanía. (s.f.). *Módulo con LED emisor de infrarrojo KY-005*. Obtenido de <https://www.electromania.pe/producto/modulo-con-led-emisor-de-infrarrojo-ky-005/>
- Electromanía. (s.f.). *Módulo receptor de infrarrojo KY-022*. Obtenido de <https://www.electromania.pe/producto/modulo-receptor-de-infrarrojo-ky-022/>
- Electromanía. (s.f.). *Sensor analógico de pH Gravity para Arduino*. Obtenido de <https://www.electromania.pe/producto/gravity-sensor-analogico-de-ph-para-arduino/>
- Garzón, S. (2006). *Evaluación del rendimiento de tres variedades de lechuga bajo el sistema NFT (Nutrient Film Technique) de hidroponía con dos soluciones de nutrientes [Tesis de licenciatura, Escuela Agrícola Panamericana, Honduras]*. Obtenido de <https://bdigital.zamorano.edu/server/api/core/bitstreams/9706303e-4908-4574-823b-b758dbaa9462/content>
- Hidroponía Río Grande. (2016). *Sistema de raíz flotante casero*. WordPress. Obtenido de <https://hidroponiariogrande.wordpress.com/2016/04/11/sistema-de-raiz-flotante-casero/>
- HIFISAC. (s.f.). *ESP32 WROOM-32: Placa de desarrollo con Bluetooth y WiFi*. Obtenido de <https://hifisac.com/shop/esp32-wroom-32-esp-wroom-32-placa-de-desarrollo-esp32-wroom32-38-pines-modulo-bluetooth-con-cp2102-1533#attr=>
- Javeriana, P. (2012). Diseño de un sistema automático de fertirriego controlado por microcontrolador [Tesis de pregrado, Pontificia Universidad Javeriana]. <https://doi.org/https://repository.javeriana.edu.co/handle/10554/7303>
- Kentstore. (s.f.). *GMC-22 AC240 – Contactor trifásico de 3 polos LS*. Obtenido de <https://kentstore.com/gmc-22-ac240/>

- Khan Academy. (2023). Tipos de sensores y su función en sistemas computacionales .
<https://doi.org/https://es.khanacademy.org/computing/ap-computer-science-principles/x2d2f703b37b450a3:computing-innovations/x2d2f703b37b450a3:monitoring-innovations/a/sensor-types>
- Martínez, A., López, I., Ruiz, A., Pineda, J., Sánchez, P., & Mendoza, C. (2021). Uncertainty analysis of the HORTSYST model applied to fertigated tomatoes cultivated in a hydroponic greenhouse system. *Spanish Journal of Agricultural Research*, 19(3), 1-13. <https://doi.org/https://doi.org/10.5424/sjar/2021193-17842>
- MEACON Sensor. (2023). *¿Qué es un sensor de pH y cómo funciona?* Obtenido de <https://es.meaconsensor.com/training/what-is-a-ph-sensor-how-does-it-work>
- Naylamp Mechatronics. (s.f.). *Bomba de agua sumergible 12 VDC-3 m-240 L/h.* . Obtenido de <https://naylampmechatronics.com/bombas-de-agua/260-bomba-de-agua-sumergible-12vdc-3m-240lh.html>
- Naylamp Mechatronics. (s.f.). *Sensor de temperatura digital DS18B20.* Obtenido de <https://naylampmechatronics.com/sensores-temperatura-y-humedad/16-sensor-de-temperatura-digital-ds18b20.html>
- Naylamp Mechatronics. (s.f.). *ESP32 DevKit V1 NodeMCU 32 (30 pines).* . Obtenido de <https://naylampmechatronics.com/espressif-esp/384-esp32-devkit-v1-nodemcu-32-30-pin-esp32-wifi-micro-usb.html>
- Resh, H. (2022). Hydroponic Food Production: A Definitive Guidebook for the Advanced Home Gardener and the Commercial Hydroponic Grower . 642. <https://doi.org/https://doi.org/10.1201/9781003133254>
- Sigma Electrónica. (s.f.). *Sensor de pH SEN0161-V2.* Obtenido de <https://www.sigmaelectronica.net/producto/sen0161-v2/>
- Tesla Electronic. (s.f.). *Sensor de humedad de suelo capacitivo V1.2.* Obtenido de <https://www.teslaelectronic.com.pe/producto/sensor-de-humedad-de-suelo-capacitivo-v1-2/>
- Uelectronics. (s.f.). *Cómo utilizar el sensor infrarrojo emisor KY-005 – Tutorial y funcionamiento* . Obtenido de <https://blog.uelectronics.com/tarjetas-desarrollo/como-utilizar-el-sensor-infrarrojo-emisor-ky-005-tutorial-funcionamiento/>
- Urdiales, V., & Espín, J. (2018). Monitoreo de un sistema hidropónico NFT a escala usando arquitectura Arduino (Parte 1). *Revista Tecnología en Marcha*, 31(2), 147. <https://doi.org/https://doi.org/10.18845/tm.v31i2.3632>

Zambrano, N. (2014). *Automatización de un cultivo hidropónico para el crecimiento de plantas de lechuga utilizando sensores análogos y controladores microchip. Universidad Nacional Abierta y a Distancia (UNAD)*. Obtenido de <https://repository.unad.edu.co/handle/10596/2771>

ANEXOS

Anexo 1 Matriz de consistencia

Problema	Objetivos	Hipótesis	Variables	Dimensiones	Indicadores
<p>Problema general</p> <p>¿Cómo diseñar y simular un sistema de control automatizado basado en ESP32 y HMI para optimizar la dosificación de solución nutritiva en cultivos hidropónicos en Tacna, considerando variables ambientales y de cultivo?</p>	<p>Objetivo General</p> <p>Diseñar y simular un sistema de control automatizado basado en ESP32 y HMI para optimizar la dosificación de solución nutritiva en función del monitoreo y control de las variables ambientales y de cultivo hidropónicos en Tacna, 2025.</p>	<p>Hipótesis general</p> <p>El diseño e implementación de un sistema automatizado basado en ESP32 y HMI Nextion permitirá optimizar la dosificación de solución nutritiva mediante el monitoreo continuo de pH, humedad y temperatura en cultivos hidropónicos de tomate en Tacna, mejorando significativamente la eficiencia del uso de recursos y el rendimiento del cultivo en comparación con los métodos manuales tradicionales.</p>	<p>Variable Independiente</p> <p>- Diseño e implementación de un sistema de control automatizado con Epp32 y HMI.</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Microcontrolador • Interfaz HMI • Interfaz Analógica digital. • Plataforma de programación • Conectividad 	<ul style="list-style-type: none"> • Estructura • Función • Número de E/S • Tamaño diagonal de pantalla • Resolución • Interfaz de comunicación • ADC DAC • Arduino IDE, • Espressif IDF • PlatformIO • Wifi Bluetooth
<p>Problemas específicos</p> <p>a. ¿Cómo implementar un sistema de monitoreo en tiempo real de variables</p>	<p>Objetivos específicos</p> <p>a. Identificar las variables ambientales y de cultivo que influyen en la dosificación de</p>	<p>Hipótesis específicas</p> <p>a. La identificación precisa de variables como temperatura, humedad y pH permitirá establecer parámetros adecuados para</p>	<p>Dependiente</p> <p>Variable Dependiente</p> <p>- Optimización de la dosificación de nutrientes en el cultivo hidropónico de tomate</p>	<p>Dimensiones</p> <ul style="list-style-type: none"> • Acidez- alcalinidad del agua • Conductividad Eléctrica • Temperatura. • Caudal. 	<p>Indicadores</p> <ul style="list-style-type: none"> • Sensor de PH • Sensor de EC • Sensor de temperatura • Sensor de caudal

<p>ambientales y de cultivo para optimizar la dosificación de solución nutritiva en cultivos hidropónicos?</p> <p>b. ¿De qué manera se puede garantizar una dosificación eficiente de solución nutritiva en cultivos hidropónicos mediante un sistema automatizado?</p> <p>c. ¿Es posible diseñar un sistema accesible y de bajo costo basado en ESP32 y HMI para la automatización de la dosificación de solución nutritiva en hidroponía?</p>	<p>solución nutritiva en cultivos hidropónicos.</p> <p>b. Desarrollar un sistema automatizado basado en ESP32 y HMI para controlar la dosificación de solución nutritiva en función de las variables ambientales y de cultivo.</p> <p>c. Simular y validar el sistema automatizado en un entorno controlado para garantizar la optimización de la dosificación de solución nutritiva en respuesta a las variables ambientales y de cultivo.</p>	<p>una dosificación eficiente de solución nutritiva.</p> <p>b. La implementación de un sistema automatizado con ESP32 y HMI garantizará un monitoreo continuo que contribuirá a reducir el error humano en la dosificación de nutrientes.</p> <p>c. La validación del prototipo en un entorno controlado demostrará que el sistema es eficiente, funcional y escalable para otros cultivos hidropónicos.</p>		<ul style="list-style-type: none"> • Nivel 	
---	---	--	--	---	--

Anexo 2 Interfaz en Nextion Editor

The screenshot displays the Nextion Editor software interface. At the top, there is a menu bar (File, Tools, Setting, Help, About) and a toolbar with icons for file operations (Open, New, Save, Compile, Debug, Upload, Copy, Cut, Paste, Lock, Unlock, Delete) and editing (Undo, Redo). A 'Device ID' dropdown is set to '100%'.

On the left side, there is a 'Toolbox' with various UI components like Text, Scrolling text, Number, Xfloat, Button, Progress bar, Picture, Crop, Hotspot, and TouchCap. Below it is a 'Picture' panel showing a selected image of a field with tomatoes and a university logo, with its ID: 0 (400X240 187.52K) jpg.

The main workspace shows a dashboard layout with several data fields:

- tm2: 00:00:00
- t0 Ph: Ph 0
- t1 Nivel: hc 0
- t3 Temp: temp 0
- t4 Humedad: hum 0
- t9 inicio: tm1 00:00
- t2 sgte: start 0
- t5 R: r 0
- t6 R: tr 0
- t7 R: cr 0
- t8 C: tc 0

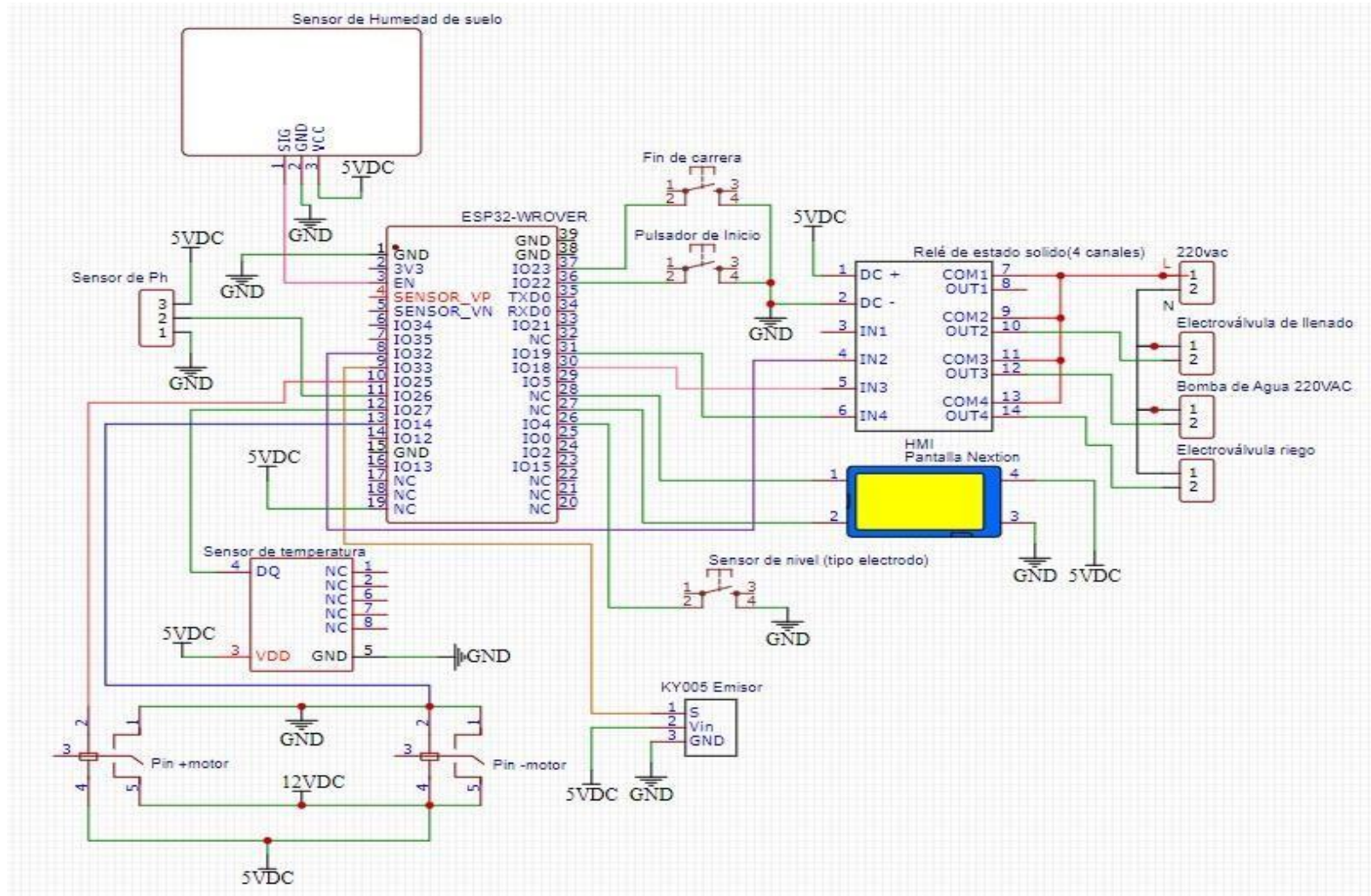
 A university logo is also present on the right side of the dashboard.

At the bottom, there are three panels:

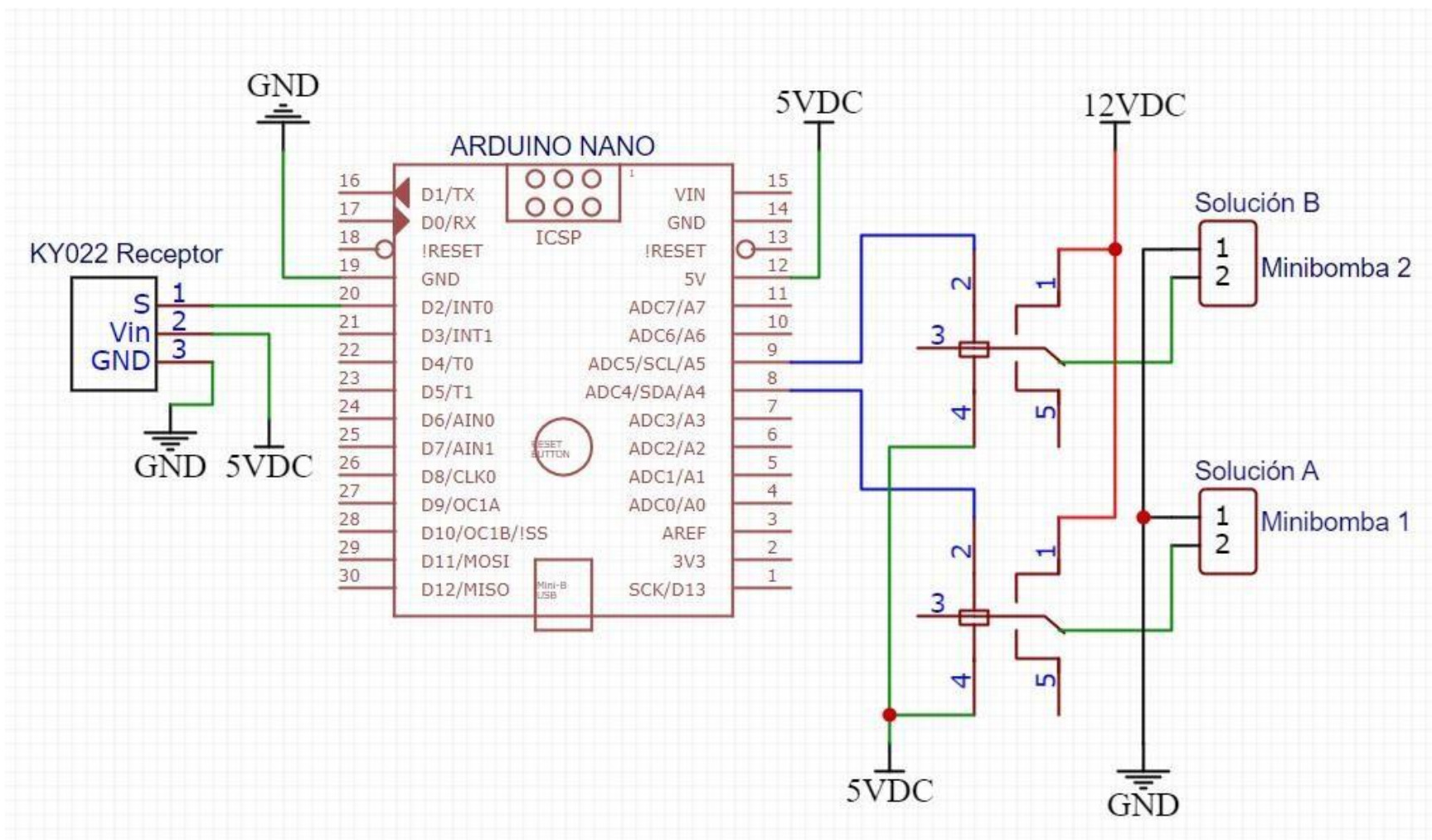
- Output:** Currently empty.
- Event:** Shows a dropdown menu with options: Preinitialize..., Postinitialize..., Touch Press..., Touch Relea..., Page Exit Ev... Below it, a note reads: '(Preinitialize event execute before component refresh)'. There are also icons for a list and a close button.
- Attribute:** Shows properties for 'page0(Page)'. The 'type' is 121, 'id' is 0, 'vscope' is local, 'sta' is solid color, and 'bco' is 65535. The 'x' and 'y' coordinates are both 0. A note at the bottom says: 'Click the attribute to display corresponding notes'.

At the very bottom of the window, system information is displayed: 'Encoding:iso-8859-1 | Model:NX4024T032_011 inch:3.2(240X400) Flash:4M RAM:3584B Frequency:48M'.

Anexo 3 Diagrama de conexiones del sistema basado en ESP32



Anexo 4 Diagrama de conexiones del subsistema controlado por el Arduino Nano



Anexo 5 Código fuente del ESP32 #include <OneWire.h>

```
#include <DallasTemperature.h>

#include <IRremote.hpp> // ✓ Librería para el emisor infrarrojo

===== DEFINICIÓN DE PINES =====

#define MOTOR_SUBIR_PIN 25

#define MOTOR_BAJA_PIN 14

#define FIN_CARRERA_PIN 23

#define PULSADOR_PROCESO_PIN 22

#define ELECTRODO_NIVEL_PIN 4

#define ELECTROVALVULA_LLENO_PIN 32

#define BOMBA_MEZCLA_PIN 18

#define ELECTROVALVULA_RIEGO_PIN 19

#define SENSOR_PH_PIN 26

#define SENSOR_HUMEDAD_SUELO_PIN 36

#define IR_SEND_PIN 33 // ✓ Emisor infrarrojo en pin 33

#define RX2 16 // UART para Nextion #define TX2 17 // Configuración del sensor de
temperatura DS18B20 #define ONE_WIRE_BUS 27 OneWire
oneWire(ONE_WIRE_BUS); DallasTemperature sensors(&oneWire);

===== VARIABLES DE PROCESO 1 =====

int etapaProceso = 0; bool estadoAnteriorPulsador = HIGH; unsigned long ultimoCambio
= 0; const unsigned long debounceDelay = 200; bool motorBajaEnProceso = false;
unsigned long tiempoInicioBaja = 0; bool esperandoNivel = false; unsigned long
tiempoNivel = 0; bool llenando = false; bool esperandoApagadoLlenado = false;
unsigned long tiempoDetectadoLleno = 0; bool motorSubiendo = false; bool
procesoiniciado = false; // ✓ Indica si el proceso principal ya comenzó

===== VARIABLES DE ETAPA 4 CON IR =====

bool enviandoIR = false; unsigned long tiempoInicioIR = 0; const unsigned long
TIEMPO_ENVIO_IR = 1000; // 1 segundo bool mezclaActiva = false; unsigned long
tiempoInicioMezcla = 0; bool motorBajandoPh = false; unsigned long tiempoBajaPh = 0;
```

```

bool midiendoPh = false; unsigned long tiempoInicioMedicionPh = 0; bool
motorSubirFinal = false; String ultimoEstadoTM2 = "";



===== VARIABLES DE PROCESO 2 =====

bool proceso2Activo = false; unsigned long tiempoInicioProceso2 = 0; const unsigned
long TIEMPO_ESPERA_PROCESO2 = 3000; // Variables de riego automático bool
riegoActivo = false; bool esperandoCiclo = false; unsigned long tiempoInicioRiego = 0;
unsigned long tiempoInicioCiclo = 0; unsigned long tiempoRiegoCalculado = 0; unsigned
long tiempoCicloCalculado = 0; int cantidadRiegosCalculada = 0; int riegoActual = 0;
const int HUMEDAD_MINIMA = 30; const int HUMEDAD_OPTIMA = 60; const float
TEMP_OPTIMA_MIN = 18.0; const float TEMP_OPTIMA_MAX = 25.0;

===== PRUEBAS MANUALES =====

bool motorBajaManual = false; unsigned long tiempoInicioBajaManual = 0; unsigned long
duracionBajaManual = 0;

===== SETUP =====

void setup() { Serial.begin(115200); Serial2.begin(9600, SERIAL_8N1, RX2, TX2);
sensors.begin(); // Pines de salida pinMode(MOTOR_SUBIR_PIN, OUTPUT);
pinMode(MOTOR_BAJA_PIN, OUTPUT); pinMode(ELECTROVALVULA_LLENO_PIN,
OUTPUT);          pinMode(BOMBA_MEZCLA_PIN,          OUTPUT);
pinMode(ELECTROVALVULA_RIEGO_PIN, OUTPUT); //  Inicializar emisor
infrarrojo IrSender.begin(IR_SEND_PIN, ENABLE_LED_FEEDBACK); // Entradas
pinMode(FIN_CARRERA_PIN,          INPUT_PULLUP);
pinMode(PULSADOR_PROCESO_PIN,          INPUT_PULLUP);
pinMode(ELECTRODO_NIVEL_PIN, INPUT_PULLUP); pinMode(SENSOR_PH_PIN,
INPUT); pinMode(SENSOR_HUMEDAD_SUELO_PIN, INPUT); // Inicializar relés
apagados (HIGH)          digitalWrite(MOTOR_SUBIR_PIN,          HIGH);
digitalWrite(MOTOR_BAJA_PIN,          HIGH);
digitalWrite(ELECTROVALVULA_LLENO_PIN,          HIGH);
digitalWrite(BOMBA_MEZCLA_PIN,          HIGH);
digitalWrite(ELECTROVALVULA_RIEGO_PIN,  HIGH); // Pantalla Nextion
mostrarEnNextion("tm2",          "Iniciando...");          mostrarEnNextion("hc",          "--");
mostrarEnNextion("tPh",          "--"); mostrarEnNextion("temp",          "--"); mostrarEnNextion("hum",
"--"); mostrarEnNextion("ri",          "--"); mostrarEnNextion("tr",          "--"); mostrarEnNextion("cr",          "--");
mostrarEnNextion("tc",          "--");          mostrarEnNextion("start",          "0");
mostrarEtapa(etapaProceso); mostrarEnNextion("tm1", "No"); //  El sistema está en
reposo inicialmente Serial.println("Sistema inicializado con emisor IR en pin 33.");

```

===== LOOP PRINCIPAL =====

```
void loop() { procesarComandosSerial(); controlMotorBajaManual();
controlFinCarreraMotorSubir(); if (!proceso2Activo) ejecutarProceso1(); if (etapaProceso
== 9 && !proceso2Activo) { if (millis() - tiempoInicioProceso2 >=
TIEMPO_ESPERA_PROCESO2) iniciarProceso2();} if (proceso2Activo)
ejecutarProceso2(); }
```

===== FUNCIONES DE PROCESO 1 =====

```
void ejecutarProceso1() { // Etapas 0–3 sin cambios if (etapaProceso == 0) { if
(digitalRead(FIN_CARRERA_PIN) == LOW) { if (ultimoEstadoTM2 != "Sist. listo") {
mostrarEnNextion("tm2", "Sist. listo"); ultimoEstadoTM2 = "Sist. listo";
mostrarEtapa(etapaProceso);} } else { if (ultimoEstadoTM2 != "No listo") {
mostrarEnNextion("tm2", "No listo"); ultimoEstadoTM2 = "No listo";
mostrarEtapa(etapaProceso);}} if (etapaProceso == 0 &&
digitalRead(FIN_CARRERA_PIN) == LOW) { bool estadoActualPulsador =
digitalRead(PULSADOR_PROCESO_PIN); if (estadoAnteriorPulsador == HIGH &&
estadoActualPulsador == LOW && millis() - ultimoCambio > debounceDelay) {
etapaProceso = 1; mostrarEtapa(etapaProceso); digitalWrite(MOTOR_BAJA_PIN,
LOW); motorBajaEnProceso = true; tiempoInicioBaja = millis(); mostrarEnNextion("tm2",
"Bajando"); Serial.println("ETAPA 1: Bajando por 9 segundos"); ultimoCambio = millis();
//  Actualizar indicador de inicio de proceso procesolniciado = true;
mostrarEnNextion("tm1", "Si"); estadoAnteriorPulsador = estadoActualPulsador;} if
(etapaProceso == 1 && motorBajaEnProceso && millis() - tiempoInicioBaja >= 9000) {
digitalWrite(MOTOR_BAJA_PIN, HIGH); motorBajaEnProceso = false; etapaProceso =
2; mostrarEtapa(etapaProceso); esperandoNivel = true; tiempoNivel = millis();
mostrarEnNextion("tm2", "Esperando...");} if (etapaProceso == 2 && esperandoNivel &&
millis() - tiempoNivel >= 3000) { esperandoNivel = false; bool hayAgua =
digitalRead(ELECTRODO_NIVEL_PIN) == LOW; if (hayAgua) {
mostrarEnNextion("tm2", "Nivel OK"); mostrarEnNextion("hc", "ok"); etapaProceso = 3;
mostrarEtapa(etapaProceso);} else { digitalWrite(ELECTROVALVULA_LLENO_PIN,
LOW); llenando = true; mostrarEnNextion("tm2", "Llenando..."); mostrarEnNextion("hc",
"bajo");}} if (etapaProceso == 2 && llenando &&
digitalRead(ELECTRODO_NIVEL_PIN) == LOW) { if (!esperandoApagadoLlenado) {
esperandoApagadoLlenado = true; tiempoDetectadoLleno = millis(); } if
(esperandoApagadoLlenado && millis() - tiempoDetectadoLleno >= 1000) {
digitalWrite(ELECTROVALVULA_LLENO_PIN, HIGH);
```

```
llenando = false; esperandoApagadoLlenado = false; mostrarEnNextion("tm2", "Nivel
OK"); mostrarEnNextion("hc", "ok"); etapaProceso = 3; mostrarEtapa(etapaProceso); }}
if (etapaProceso == 3) { if (digitalRead(FIN_CARRERA_PIN) == HIGH) {
digitalWrite(MOTOR_SUBIR_PIN, LOW); motorSubiendo = true;
mostrarEnNextion("tm2", "Subiendo"); } else { etapaProceso = 4;
mostrarEtapa(etapaProceso);}} if (etapaProceso == 3 && motorSubiendo &&
digitalRead(FIN_CARRERA_PIN) == LOW) { digitalWrite(MOTOR_SUBIR_PIN, HIGH);
motorSubiendo = false; etapaProceso = 4; mostrarEtapa(etapaProceso);
mostrarEnNextion("tm2", "Listo");}
```

===== ETAPA 4: EMISIÓN INFRARROJA =====

```
if (etapaProceso == 4 && !enviandoIR) { mostrarEnNextion("tm2", "Enviando IR...");
Serial.println("ETAPA 4: Activando emisor infrarrojo (formato IRremote 4.x)"); enviandoIR
= true; tiempoInicioIR = millis(); // Enviar el código NEC varias veces durante 1 segundo
while (millis() - tiempoInicioIR < TIEMPO_ENVIO_IR) { IrSender.sendNEC(0x0102,
0x34, 0); delay(100); } etapaProceso = 5; mostrarEtapa(etapaProceso); mezclaActiva =
true; tiempoInicioMezcla = millis(); digitalWrite(BOMBA_MEZCLA_PIN, LOW);
mostrarEnNextion("tm2", "Mezclando"); Serial.println("ETAPA 4: Señal IR enviada
correctamente.");}
```

===== ETAPA5 EN ADELANTE SIN CAMBIOS =====

```
if (etapaProceso == 5 && mezclaActiva && millis() - tiempoInicioMezcla >= 60000) {
digitalWrite(BOMBA_MEZCLA_PIN, HIGH); mezclaActiva = false; etapaProceso = 6;
mostrarEtapa(etapaProceso); mostrarEnNextion("tm2", "Mezcla OK");
digitalWrite(MOTOR_BAJA_PIN, LOW); motorBajandoPh = true; tiempoBajaPh = millis();
} if (etapaProceso == 6 && motorBajandoPh && millis() - tiempoBajaPh >= 9000) {
digitalWrite(MOTOR_BAJA_PIN, HIGH); motorBajandoPh = false; etapaProceso = 7;
mostrarEtapa(etapaProceso); mostrarEnNextion("tm2", "Ph..."); midiendoPh = true;
tiempoInicioMedicionPh = millis();} if (etapaProceso == 7 && midiendoPh && millis() -
tiempoInicioMedicionPh <= 5000) { int total = 0; for (int i = 0; i < 10; i++) { total +=
analogRead(SENSOR_PH_PIN); delay(5); } nt promedio = total / 10; float volt = promedio
* (3.3 / 4095.0); float ph = 7 + ((2.5 - volt) / 0.18); char buffer[10]; dtostrf(ph, 4, 2, buffer);
mostrarEnNextion("tPh", buffer);} if (etapaProceso == 7 && millis() -
tiempoInicioMedicionPh > 5000) { midiendoPh = false; etapaProceso = 8;
mostrarEtapa(etapaProceso); mostrarEnNextion("tm2", "Ph listo");
digitalWrite(MOTOR_SUBIR_PIN, LOW); motorSubirFinal = true;} if (etapaProceso ==
8 && motorSubirFinal && digitalRead(FIN_CARRERA_PIN) == LOW)
```

```
{digitalWrite(MOTOR_SUBIR_PIN, HIGH); motorSubirFinal = false; etapaProceso = 9;
mostrarEtapa(etapaProceso);          mostrarEnNextion("tm2",          "Completado");
tiempolnicioProceso2 = millis(); }} (Procesos 2, auxiliares y Nextion igual que tu versión
previa) // ¡ Mantén todo el bloque de funciones del proceso 2 y auxiliares sin cambios
(idéntico a tu versión anterior)
```

```
// ===== FUNCIONES DE PROCESO 2 =====
```

```
void iniciarProceso2() { proceso 2Activo = true; etapaProceso = 10; // Nueva etapa para
Proceso 2 mostrarEtapa(etapaProceso); mostrarEnNextion("tm2", "Calculando...");
Serial.println("PROCESO 2: Iniciando sistema de riego automatizado"); // Calcular
parámetros de riego basados en sensores calcularParametrosRiego(); // Iniciar primer
riego inmediatamente después del cálculo iniciarRiego(); } void ejecutarProceso2() { //
Leer sensores continuamente float temperatura = leerTemperatura(); int humedadSuelo
= leerHumedadSuelo(); // Mostrar valores en Nextion
mostrarValoresSensores(temperatura, humedadSuelo); if (riegoActivo) { // Riego en
progreso controlarRiegoEnProgreso(); } else if (esperandoCiclo) { // Esperando tiempo de
ciclo entre riegos controlarEsperaCiclo();
```

```
} else { // Si no está regando ni esperando ciclo, iniciar siguiente riego if (riegoActual <
cantidadRiegosCalculada) {iniciarRiego();} else { // Todos los riegos completados -
reiniciar sistema finalizarProceso2();}} void calcularParametrosRiego() {float temperatura
= leerTemperatura(); int humedadSuelo = leerHumedadSuelo(); // Cálculo basado en las
condiciones ambientales (Tacna, Perú) // Factor de temperatura (riego más frecuente en
temperaturas altas) float factorTemperatura = 1.0; if (temperatura >
TEMP_OPTIMA_MAX) {factorTemperatura = 1.5 + (temperatura -
TEMP_OPTIMA_MAX) * 0.1; } else if (temperatura < TEMP_OPTIMA_MIN) {
factorTemperatura = 0.7 + (temperatura - 10) * 0.03; // Factor de humedad (riego más
frecuente si está muy seco) float factorHumedad = 1.0; if (humedadSuelo < 40) {
factorHumedad = 1.3;} else if (humedadSuelo < 50) { factorHumedad = 1.1;} // Cálculo
de parámetros base cantidadRiegosCalculada = map(humedadSuelo, 20, 80, 6, 3);
cantidadRiegosCalculada = constrain(cantidadRiegosCalculada, 3, 6); // Tiempo de
riego en minutos (base 2-4 minutos) - REDONDEADO A MINUTOS EXACTOS int
tiempoRiegoMinutos = map(humedadSuelo, 20, 80, 4, 2); tiempoRiegoMinutos =
constrain(tiempoRiegoMinutos, 2, 4); tiempoRiegoCalculado = tiempoRiegoMinutos *
60UL * 1000UL; // Convertir a milisegundos // Tiempo de ciclo en horas (base 2-4
horas) - REDONDEADO A MINUTOS EXACTOS int tiempoCicloHoras =
map(humedadSuelo, 20, 80, 2, 4); tiempoCicloHoras = constrain(tiempoCicloHoras, 2,
4); tiempoCicloCalculado = tiempoCicloHoras * 60UL * 60UL * 1000UL; // Convertir
```

```

a milisegundos // Aplicar factores de ajuste tiempoRiegoCalculado = (unsigned
long)(tiempoRiegoCalculado * factorTemperatura * factorHumedad);
tiempoCicloCalculado = (unsigned long)(tiempoCicloCalculado / (factorTemperatura *
factorHumedad)); // Limitar valores extremos y REDONDEAR A MINUTOS EXACTOS
tiempoRiegoCalculado = constrain(tiempoRiegoCalculado, 60000UL, 300000UL); // 1- 5
minutos tiempoCicloCalculado = constrain(tiempoCicloCalculado, 1800000UL,
14400000UL); // 0.5-4 horas // REDONDEAR A MINUTOS EXACTOS para evitar
decimales tiempoRiegoCalculado = (tiempoRiegoCalculado / 60000UL) * 60000UL; //
Redondear a minutos exactos tiempoCicloCalculado = (tiempoCicloCalculado /
60000UL) * 60000UL; // Redondear a minutos exactos // Mostrar parámetros en Nextion
- AHORA CON FORMATO CONSISTENTE char crBuffer[10]; sprintf(crBuffer, "0/%d",
cantidadRiegosCalculada); mostrarEnNextion("cr", crBuffer); // Mostrar tiempo de riego
en formato minutos:segundos int trMinutos = tiempoRiegoCalculado / 60000; int
trSegundos = (tiempoRiegoCalculado % 60000) / 1000; char trBuffer[15]; sprintf(trBuffer,
"%d:%02dm", trMinutos, trSegundos); mostrarEnNextion("tr", trBuffer); // Mostrar tiempo
de ciclo en formato horas:minutos int tcHoras = tiempoCicloCalculado / 3600000; int
tcMinutos = (tiempoCicloCalculado % 3600000) / 60000; char tcBuffer[15]; if (tcHoras >
0) { sprintf(tcBuffer, "%dh %02dm", tcHoras, tcMinutos); } else { sprintf(tcBuffer, "%dm",
tcMinutos); } mostrarEnNextion("tc", tcBuffer); Serial.println("Parámetros de riego
calculados:"); Serial.println("Cantidad de riegos: " + String(cantidadRiegosCalculada));
Serial.println("Tiempo de riego: " + String(trMinutos) + " minutos " + String(trSegundos) +
" segundos"); Serial.println("Tiempo de ciclo: " + String(tcHoras) + " horas " +
String(tcMinutos) + " minutos"); Serial.println("Temperatura: " + String(temperatura) +
"°C"); Serial.println("Humedad suelo: " + String(humedadSuelo) + "%");} void
iniciarRiego() { riegoActivo = true; esperandoCiclo = false; tiempoInicioRiego = millis(); //
Activar bomba y electroválvula digitalWrite(BOMBA_MEZCLA_PIN, LOW); // SSR3 -
Bomba de agua digitalWrite(ELECTROVALVULA_RIEGO_PIN, LOW); // SSR4 -
Electroválvula de riego // Mostrar en Nextion mostrarEnNextion("tm2", "Regando"); //
Actualizar contador de riegos en formato X/Y char crBuffer[10]; sprintf(crBuffer, "%d/%d",
riegoActual + 1, cantidadRiegosCalculada); mostrarEnNextion("cr", crBuffer);
Serial.println("Iniciando riego " + String(riegoActual + 1) +
" de " + String(cantidadRiegosCalculada)); Serial.println("Tiempo de
riego: " + String(tiempoRiegoCalculado / 60000) + " minutos"); } void
controlarRiegoEnProgreso() { unsigned long tiempoActual = millis(); unsigned long
tiempoTranscurrido = tiempoActual - tiempoInicioRiego; // Calcular tiempo restante de
forma segura unsigned long tiempoRestante; if (tiempoTranscurrido >=
tiempoRiegoCalculado) {tiempoRestante = 0; } else { tiempoRestante =

```

```

tiempoRiegoCalculado - tiempoTranscurrido;} // Actualizar cuenta regresiva en Nextion
(objectname "ri") if (tiempoRestante > 0) {unsigned long segundosTotales =
tiempoRestante / 1000; int minutos = segundosTotales / 60;int segundos =
segundosTotales % 60; char riBuffer[10]; sprintf(riBuffer, "%d:%02dm", minutos,
segundos); mostrarEnNextion("ri", riBuffer);} // Verificar si el riego debe terminar if
(tiempoTranscurrido >= tiempoRiegoCalculado) { finalizarRiego(); } void finalizarRiego()
{// Desactivar bomba y electroválvula digitalWrite(BOMBA_MEZCLA_PIN, HIGH); //
SSR3 - Bomba de agua digitalWrite(ELECTROVALVULA_RIEGO_PIN, HIGH); // SSR4
- Electroválvula de riego riegoActivo = false; riegoActual++; // Mostrar en Nextion
mostrarEnNextion("tm2", "Riego fin"); mostrarEnNextion("ri", "0:00m");
Serial.println("Riego " + String(riegoActual) + " finalizado"); // Verificar si es el último riego
if (riegoActual >= cantidadRiegosCalculada) { // Todos los riegos completados
Serial.println("Todos los riegos completados"); mostrarEnNextion("tm2", "Ciclo
completo"); delay(2000); // Breve pausa antes del reset //  REINICIAR ESP32 después
del último riego finalizarProceso2(); } else { // Iniciar espera de ciclo para siguiente riego
esperandoCiclo = true; tiempoInicioCiclo = millis(); mostrarEnNextion("tm2", "Espera
ciclo");} void controlarEsperaCiclo() { unsigned long tiempoActual = millis(); unsigned
long tiempoTranscurrido = tiempoActual - tiempoInicioCiclo; // Calcular tiempo restante
de forma segura unsigned long tiempoRestante; if (tiempoTranscurrido >=
tiempoCicloCalculado) { tiempoRestante = 0; else { tiempoRestante =
tiempoCicloCalculado - tiempoTranscurrido; } // Actualizar cuenta regresiva en Nextion
(objectname "start") if (tiempoRestante > 0) { unsigned long segundosTotales =
tiempoRestante / 1000; int horas = segundosTotales / 3600; int minutos =
(segundosTotales % 3600) / 60; int segundos = segundosTotales % 60; char
startBuffer[15]; sprintf(startBuffer, "%02d:%02d:%02d", horas, minutos, segundos);
mostrarEnNextion("start", startBuffer); } // Verificar si el tiempo de ciclo ha terminado if
(tiempoTranscurrido >= tiempoCicloCalculado) { esperandoCiclo = false;
mostrarEnNextion("start", "00:00:00");} void finalizarProceso2() {
Serial.println("PROCESO 2 COMPLETADO - Reiniciando sistema...");
mostrarEnNextion("tm2", "Reiniciando..."); //  RESTABLECER TODOS LOS
VALORES A ESTADO INICIAL mostrarEnNextion("cr", "--"); mostrarEnNextion("tr", "--");
mostrarEnNextion("tc", "--"); mostrarEnNextion("ri", "--"); mostrarEnNextion("start", "0");
mostrarEnNextion("hc", "--"); mostrarEnNextion("tPh", "--");mostrarEnNextion("temp", "--
");mostrarEnNextion("hum", "--"); delay(3000); // Pausa para mostrar mensaje final // 
REINICIAR ESP32 Serial.println("Reiniciando ESP32..."); ESP.restart(); } float
leerTemperatura() { sensors.requestTemperatures(); float temperatura =

```

```
sensors.getTempCByIndex(0); return temperatura;} int leerHumedadSuelo() {int lectura
= analogRead(SENSOR_HUMEDAD_SUELO_PIN); // Convertir lectura ADC a
porcentaje (0-100%) // Ajustar estos valores según la calibración de tu sensor int
humedad = map(lectura, 1500, 3500, 0, 100); return constrain(humedad, 0, 100);} void
mostrarValoresSensores(float temperatura, int humedadSuelo) { // Mostrar temperatura
char tempStr[10]; dtostrf(temperatura, 4, 1, tempStr); mostrarEnNextion("temp",
tempStr); // Mostrar humedad del suelo char humStr[10]; sprintf(humStr, "%d",
humedadSuelo); mostrarEnNextion("hum", humStr); }
```

===== FUNCIONES AUXILIARES =====

```
void procesarComandosSerial() { if (Serial.available()) { String comando =
Serial.readStringUntil('\n'); comando.trim(); if (comando == "s") { if
(digitalRead(FIN_CARRERA_PIN) == HIGH) { digitalWrite(MOTOR_SUBIR_PIN,
LOW); Serial.println("Motor SUBIR activado (prueba)"); } else { Serial.println("Motor
SUBIR NO activado (fin de carrera ya activo)"); } } if (comando.startsWith("b")) { int
segundos = comando.substring(1).toInt(); if (segundos > 0) {
digitalWrite(MOTOR_BAJA_PIN, LOW); motorBajaManual = true; duracionBajaManual
= segundos * 1000UL; tiempoInicioBajaManual = millis(); Serial.print("Motor BAJA
activado por "); Serial.print(segundos); Serial.println(" segundos (prueba)"); } else {
Serial.println("Formato inválido. Usa 'b9' para 9 segundos.");}} if (comando == "reset") {
ESP.restart();}} void controlMotorBajaManual() { if (motorBajaManual && millis() -
tiempoInicioBajaManual >= duracionBajaManual) { digitalWrite(MOTOR_BAJA_PIN,
HIGH); motorBajaManual = false; Serial.println("Motor BAJA detenido (prueba)");}} void
controlFinCarreraMotorSubir() {if (digitalRead(FIN_CARRERA_PIN) == LOW &&
digitalRead(MOTOR_SUBIR_PIN)
== LOW) {digitalWrite(MOTOR_SUBIR_PIN, HIGH);Serial.println("Motor SUBIR
detenido (fin de carrera alcanzado)");}}
```

===== FUNCIONES NEXTION =====

```
void mostrarEnNextion(const char* object, const char* msg) { Serial2.print(object);
Serial2.print(".txt=\"); Serial2.print(msg); Serial2.print("\"); Serial2.write(0xFF);
Serial2.write(0xFF); Serial2.write(0xFF); } void mostrarEtapa(int etapa) { char
etapaStr[10]; sprintf(etapaStr, "%d", etapa); Serial2.print("start.txt=\");
Serial2.print(etapaStr); Serial2.print("\"); Serial2.write(0xFF); Serial2.write(0xFF);
Serial2.write(0xFF); }
```

Anexo 6 Código fuente del Arduino Nano

```
#include <IRremote.h> // Librería >v3.0.0 (compatible con v4.5.0) #define PIN_RECV 2
// Pin receptor IR #define RELAY_A_PIN A4 // Relay 1 (Solución A) - 4 segundos #define
RELAY_B_PIN A5 // Relay 2 (Solución B) - 2 segundos

// Variables de control

bool procesoEnEjecucion = false; unsigned long tiempoInicio = 0; const unsigned long
DURACION_A = 3000; // 3 s const unsigned long DURACION_B = 1000; // 1 s int etapa
= 0; void setup() { Serial.begin(9600); pinMode(PIN_RECV, INPUT_PULLUP); // pull-up
para estabilidad IrReceiver.begin(PIN_RECV, ENABLE_LED_FEEDBACK);

pinMode(RELAY_A_PIN, OUTPUT); pinMode(RELAY_B_PIN, OUTPUT);
digitalWrite(RELAY_A_PIN, HIGH); digitalWrite(RELAY_B_PIN, HIGH);
Serial.println("Receptor IR + Control Serial listo."); Serial.println("Envía 's' para activar
manualmente el proceso."); } void loop() {

----- ACTIVACIÓN POR IR -----

if (IrReceiver.decode()) { if (!procesoEnEjecucion) {Serial.println("Señal IR recibida:");
IrReceiver.printIRResultShort(&Serial); Serial.println(); if
(IrReceiver.decodedIRData.address == 0x0102 &&
IrReceiver.decodedIRData.command == 0x34) { iniciarProceso(); }IrReceiver.resume();}

----- ACTIVACIÓN POR SERIAL -----


if (Serial.available()) { char comando = Serial.read(); if (comando == 's' || comando == 'S')
{ if (!procesoEnEjecucion) { Serial.println(" 🚫Activación manual recibida ('s'). Iniciando
proceso..."); iniciarProceso(); } else { Serial.println("¡ Proceso en ejecución. Espera a
que termine.");}}}

----- CONTROL DE SECUENCIA -----

if (procesoEnEjecucion) {unsigned long tiempoActual = millis(); // Etapa 1: bomba B
primero (6 segundos) if (etapa == 1 && tiempoActual - tiempoInicio >= DURACION_B) {
digitalWrite(RELAY_B_PIN, HIGH); Serial.println("← Solución B (A5) DESACTIVADA");
etapa = 2; tiempoInicio = millis(); // Luego activar bomba A digitalWrite(RELAY_A_PIN,
LOW); Serial.println("→ Solución A (A4) ACTIVADA"); } // Etapa 2: bomba A (3 segundos)
if (etapa == 2 && tiempoActual - tiempoInicio >= DURACION_A) {
digitalWrite(RELAY_A_PIN, HIGH); Serial.println("← Solución A (A4) DESACTIVADA");
// Proceso completo procesoEnEjecucion = false; etapa = 0; Serial.println(" ✅
Dosificación completada.\n"); }}}}
```

===== FUNCIONES =====

```
void iniciarProceso() { procesoEnEjecucion = true; etapa = 1; tiempoInicio = millis();
```

```
// Activar primero la bomba B digitalWrite(RELAY_B_PIN, LOW); Serial.println("   
Código válido detectado. Iniciando dosificación..."); Serial.println("→ Solución B (A5)  
ACTIVADA"); }
```

Anexo 7 Diagrama de flujo del sistema automatizado.

