



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE
FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS
CARRERA DE INGENIERÍA EN MECATRÓNICA

**Automatización de un sistema de fertirrigación por goteo para un
invernadero de flores**

Trabajo de grado previo a la obtención de título de Ingeniero en Mecatrónica

Línea de investigación: Producción industrial y tecnología sostenible

Autor:

Jhon Smith Fonte Paisano

Director:

Ing. Hugo Eduardo Salazar García

Asesor:

Ing. Juan Carlos Paz Espinoza

Ibarra, Ecuador 2025



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE
BIBLIOTECA UNIVERSITARIA

1. IDENTIFICACIÓN DE LA OBRA

En cumplimiento del Art. 144 de la Ley de Educación Superior, hago la entrega del presente trabajo a la Universidad Técnica del Norte para que sea publicado en el Repositorio Digital Institucional, para lo cual pongo a disposición la siguiente información:

DATOS DE CONTACTO			
CÉDULA DE IDENTIDAD:	1004933519		
APELLIDOS Y NOMBRES:	Fonte Paisano Jhon Smith		
DIRECCIÓN:	Otavalo - Imbabura		
EMAIL:	Fontejhon53@gmail.com		
TELÉFONO FIJO:		TELÉFONO MÓVIL:	0960894823

DATOS DE LA OBRA	
TÍTULO:	Automatización de un sistema de fertirrigación por goteo para un invernadero de flores.
AUTOR (ES):	Jhon Smith Fonte Paisano
FECHA: DD/MM/AAAA	4/09/2025
PROGRAMA:	<input checked="" type="checkbox"/> GRADO <input type="checkbox"/> POSGRADO
TITULO POR EL QUE OPTA:	Ingeniero en Mecatrónica
ASESOR /DIRECTOR:	Ing. Hugo Eduardo Salazar García

2. CONSTANCIAS

El autor manifiesta que la obra objeto de la presente autorización es original y se la desarrolló, sin violar derechos de autor de terceros, por lo tanto, la obra es original y que es titular de los derechos patrimoniales, por lo que asume la responsabilidad sobre el contenido de la misma y saldrá en defensa de la Universidad en caso de reclamación por parte de terceros.

Ibarra, a los 4 días del mes de septiembre de 2025

EL AUTOR:

Firma: 

Nombre: Jhon Smith Fonte Paisano

C.I. 1004933519



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE
FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICAS
CARRERA DE INGENIERÍA EN MECATRÓNICA

**CERTIFICACIÓN DEL DIRECTOR DEL TRABAJO DE
INTEGRACIÓN CURRICULAR**

Ibarra, 04 de septiembre de 2025

Ing. Hugo Eduardo Salazar García

DIRECTOR DEL TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR

CERTIFICA:

Haber revisado el presente informe final del Trabajo de Integración Curricular, el mismo que se ajusta a las normas vigentes de la Universidad Técnica del Norte; en consecuencia, autorizo su presentación para los fines legales pertinentes.

(f)
Ing. Hugo Eduardo Salazar García
C.C.: 1002582177




UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE
FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICAS
CARRERA DE INGENIERÍA EN MECATRÓNICA

APROBACIÓN DEL COMITÉ CALIFICADOR

El Comité Calificado del trabajo de Integración Curricular “AUTOMATIZACIÓN DE UN SISTEMA DE FERTIRRIGACIÓN POR GOTEO PARA UN INVERNADERO DE FLORES” elaborado por JHON SMITH FONTE PAISANO, previo a la obtención del título de INGENIERO EN MECATRÓNICA, aprueba el presente informe de investigación en nombre de la Universidad Técnica del Norte:

(f).....
Ing. Hugo Eduardo Salazar García
C.C.: 1002582177

(f).....
Ing. Juan Carlos Paz Espinoza
C.C.: 1002834800

DEDICATORIA

A Dios fuente de toda sabiduría y fortaleza

A mis padres, Alfonso y Orfelina, quienes siempre me han impulsado a seguir adelante, motivándome a superarme cada día y apoyándome en cada caída.

También a mis hermanos, por brindarme siempre su apoyo moral, y a todos aquellos que creyeron en mí; su confianza y actitud positiva me dieron el impulso necesario para seguir adelante.

AGRADECIMIENTO

Agradezco a la Universidad Técnica del Norte, por brindarme la oportunidad de formarme tanto académicamente como personalmente.

A mis profesores de la Carrera de Ingeniería en Mecatrónica, por su dedicación al compartir sus conocimientos que han sido fundamentales a lo largo de esta etapa de formación profesional.

RESUMEN

El presente trabajo aborda la implementación de un sistema automatizado de fertirrigación por goteo en un invernadero de flores con el propósito de mejorar el uso del agua y los nutrientes, optimizando la eficiencia de los nutrientes y reduciendo desperdicios. Se identificó la necesidad de un sistema que permitiera controlar de manera precisa la cantidad de agua y fertilizantes aplicados, garantizando condiciones adecuadas para el desarrollo del cultivo. Para ello, se desarrolló una Alternativa 2asada en un microcontrolador ESP32 y sensor de pH, así como una pantalla LCD para la visualización de los parámetros en tiempo real. La metodología empleada incluyó el análisis de requisitos, el diseño del sistema y la validación del funcionamiento. Los resultados obtenidos demostraron que la automatización del sistema permitió una gestión más eficiente de fertirrigación, asegurando una distribución uniforme del agua y los fertilizantes de acuerdo con las necesidades del cultivo. La implementación del sistema representa una alternativa viable para mejorar la productividad y sostenibilidad en invernaderos de flores, proporcionando un modelo escalable y adaptable a diferentes condiciones de cultivo.

Palabras clave: Fertirrigación, Automatización, Invernadero, Flores

ABSTRACT

This work addresses the implementation of an automated drip fertigation system in a flower greenhouse with the purpose of improving the use of water and nutrients, optimizing nutrient efficiency and reducing waste. The need was identified for a system that would allow precise control of the amount of water and fertilizer applied, ensuring adequate conditions for crop development. To this end, a solution was developed based on an ESP32 microcontroller and pH sensor, as well as an LCD display for real-time visualization of the parameters. The methodology employed included requirements analysis, system design and performance validation. The results obtained showed that the automation of the system allowed a more efficient fertigation management, ensuring a uniform distribution of water and fertilizers according to crop needs. The implementation of the system represents a viable alternative to improve productivity and sustainability in flower greenhouses, providing a scalable and adaptable model to different growing conditions.

Keywords: Fertigation, Automation, Greenhouse, Flowers

INDICE DE CONTENIDOS

1. IDENTIFICACIÓN DE LA OBRA.....	ii
2. CONSTANCIAS.....	iii
AUTORIZACIÓN DE USO A FAVOR DE LA UNIVERSIDAD	iv
CERTIFICACIÓN DEL DIRECTOR DEL TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR	v
APROBACIÓN DEL COMITÉ CALIFICADOR.....	vi
DEDICATORIA.....	vii
AGRADECIMIENTO	viii
RESUMEN.....	ix
ABSTRACT.....	x
INDICE DE CONTENIDOS.....	xi
ÍNDICE DE FIGURAS	xvi
ÍNDICE DE TABLAS.....	xviii
CAPITULO I: INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 Planteamiento del problema.....	1
1.2 Objetivos.....	2
1.2.1 General.....	2
1.2.2 Específicos.....	2
1.3 Alcance y delimitación	2

1.4	Justificación	3
CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO.....		4
2.1	Antecedentes	4
2.2	Bases Teóricas	5
2.2.1	Automatización en la agricultura.....	5
2.2.2	fertirrigación por goteo	6
2.2.3	Principios de fertirrigación por goteo	6
2.2.4	Riego por goteo	7
2.2.5	Emisores en sistemas de fertirrigación por goteo	9
2.2.6	Suelo agrícola para el cultivo de flores	9
2.2.7	Fertilización	10
2.2.8	Equipo de aplicación de fertilizantes.....	11
2.2.9	Tanque de fertilización manual	11
2.2.10	Inyector Venturi.....	12
2.2.11	Bomba hidráulica.....	12
2.2.12	Sensores y actuadores	13
CAPÍTULO III: MARCO METODOLÓGICO		14
3.1	Enfoque y tipos de investigación	14
3.2	Diseño de la Investigación.....	15
3.2.1.	Fase 1: Determinación de los parámetros principales	15

3.2.2.	Fase 2: Diseño del sistema de fertirrigación automatizado	15
3.2.3.	Fase 3: Validación del sistema mediante simulación y pruebas.....	16
CAPITULO IV: RESULTADOS Y ANALISIS		17
4.1	Especificaciones del sistema.....	17
4.2	Diseño del sistema	17
4.2.1	Criterios y restricciones	18
4.3	Descripción del espacio productivo	19
4.4	Elementos que conforman la red de fertirrigación.....	20
4.4.1	Línea de distribución principal	20
4.4.2	Línea de distribución secundaria	20
4.4.3	Número de camas en la sección.....	20
4.4.4	Longitud de la cama	20
4.5	Diseño hidráulico	20
4.5.1	Líneas de goteo	21
4.6	Cálculo de pérdidas de carga en el sistema.....	21
4.7	Selección de materiales y componentes.....	27
4.8	Matriz morfológica.	27
4.9	Selección de alternativas.....	29
4.9.1	Análisis de la ponderación para cada criterio	30
4.9.2	Análisis de la ponderación de criterio de vida útil	31

4.9.3	Análisis de la ponderación de criterio de costo	31
4.9.4	Análisis de ponderación de criterio de precisión en la medición	32
4.9.5	Análisis de ponderación de criterios de capacidad de procesamiento	33
4.9.6	Cálculo de análisis de las alternativas según criterios	33
4.10	Especificación de los componentes	34
4.10.1	ESP32	34
4.10.2	Válvula Solenoide plástica 12V DC	35
4.10.3	Sensor de pH del suelo	36
4.10.4	Pantalla LCD 16x4 Con I2C.....	38
4.10.5	Bomba de agua periférica Leo APm37	39
4.11	Esquema electrónico del sistema de fertirrigación	40
4.12	Diagrama de bloque	41
4.13	Programación del sistema	41
4.14	Diagrama de flujo	42
4.15	Construcción e implementación.....	42
4.15.1	Instalación del sistema eléctrico	42
4.15.2	Implementación del sensor Soil PH-S (RS485).	43
4.15.3	Instalación de la electroválvula	44
4.15.4	Montaje del motor eléctrico.....	45
4.15.5	Implementación del gabinete de control.....	45

4.15.6	Panel de control	47
4.15.7	Panel de potencia	47
4.16	Pruebas de funcionamiento	48
4.16.1	Prueba del sensor de pH de suelo	48
4.16.2	Prueba modo manual	50
4.16.3	Prueba modo automatico	51
4.17	Validacion del sistema en el cultivo de flores	53
4.18	Costos.....	56
CONCLUSIONES.....		58
RECOMENDACIONES		59
REFERENCIAS		60
ANEXOS		63
ANEXO A: DATOS TECNICOS DEL MOTOR		63
ANEXO B: CODIGO DE PROGRAMACION		64
ANEXO C: MANUAL DE USUARIO.....		71
ANEXO D: DISEÑO DEL GABINETE.....		77

ÍNDICE DE FIGURAS

Fig. 1 Esquema de un sistema de fertirrigación por goteo	6
Fig. 2 Riego por goteo [21]	7
Fig. 3 Emisor de goteo [33].....	9
Fig. 4. Escala de pH [31].....	10
Fig. 5 Tanque de fertilización manual.....	11
Fig. 6 Proceso de inyección Venturi.	12
Fig. 7 Proceso de inyección hidráulico	13
Fig. 8 Esquema de sistema fertirrigación planteado.....	18
Fig. 9 Dimensión del área de producción.....	19
Fig. 10 Esquema de la red de tuberías del sistema.....	21
Fig. 11 Tramos de circulación para el cálculo de perdidas	22
Fig. 12 Placa Microcontrolador ESP32 [15]	34
Fig. 13 Válvula solenoide [23].....	35
Fig. 14 Sensor de pH de suelo [25]	36
Fig. 15 Pantalla LCD [26]	38
Fig. 16 Bomba periférica [19]	39
Fig. 17 Esquema electrónico	40
Fig. 18 Diagrama de bloque del sistema	41
Fig. 19 Diagrama de flujo del sistema de fertirrigación.....	42
Fig. 20 cables de la red principal para el tablero.....	43
Fig. 21 Implementación del sensor de pH de suelo	43

Fig. 22 Válvulas manuales	44
Fig. 23 Electroválvulas instaladas	44
Fig. 24 Implementación del motor eléctrico	45
Fig. 25 Diseño del panel frontal del gabinete.....	46
Fig. 26 Preparación para el ensamblaje del panel frontal del gabinete	46
Fig. 27 Sistema de control ensamblado.....	47
Fig. 28 Componentes del sistema de potencia	47
Fig. 29 Ensamblaje completo del gabinete.....	48
Fig. 30 validación de datos enviados por el sensor	49
Fig. 31 Suelo con alta concentración de fertilizantes(a), Suelo moderado de fertilizantes (b), Suelo con baja concentración de fertilizantes (c).....	49
Fig. 32 Operación en modo manual	50
Fig. 33 Interfaz modo manual	51
Fig. 34 Operación modo automático	52
Fig. 35 Interfaz modo automático	52
Fig. 36 Lectura del pH de suelo de la semana 1	53
Fig. 37 Lectura del pH de suelo de la semana 2.....	54
Fig. 38 Estado de cultivo antes de la implementación del sistema	55
Fig. 39 Estado de cultivo después de la implementación del sistema.....	55

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Componentes del sistema de fertirrigación.	18
Tabla 2. Características de la línea de goteo [15].....	21
Tabla 3. Calculo de perdidas por fricción.....	23
Tabla 4 Perdida de carga en accesorios	24
Tabla 5. Cálculo de perdida de carga de la línea de goteo	25
Tabla 6 Pérdidas totales del sistema de fertirrigación	26
Tabla 7. Matriz morfológica.....	27
Tabla 8. Análisis de la ponderación para cada criterio.....	30
Tabla 9. Análisis de la ponderación de criterio de vida útil.	31
Tabla 10. Análisis de la ponderación de criterio de costo	31
Tabla 11. Análisis de ponderación de criterio de precisión en la medición	32
Tabla 12. Análisis de ponderación de criterio de la capacidad de procesamiento	33
Tabla 13. Cálculo de análisis de solución según criterios	33
Tabla 14. Características de la ESP32 [15]	35
Tabla 15. Características de la válvula solenoide [16]	36
Tabla 16. Características del sensor de pH [17].....	37
Tabla 17. Características de la pantalla LCD 16x4 [17].....	38
Tabla 18. Caracteristicas de la Bomba periférica [19]	39
Tabla 19 Detalle de costos de los elementos de control	56
Tabla 20 Detalles de costos de los materiales para la instalación eléctrica y de control.....	56

CAPITULO I: INTRODUCCIÓN

1.1 Planteamiento del problema

El cultivo de las flores en invernaderos en Imbabura particularmente en el cantón Otavalo van en crecimiento paulatinamente [1], es uno de los cultivos que requiere de grandes cantidades de inversión económica y de la misma manera son los cultivos que generan mayor rentabilidad económica por lo que para llegar a obtener los indicadores altos en cuanto a rentabilidad se requieren de aplicación de gran cantidad de fungicidas, fertilizantes y un sistema de riego adecuado [2].

Uno de los principales problemas que tienen los pequeños productores en invernaderos es el control del sistema de fertilización y riego que se efectúa en el cultivo ya que utilizan técnicas de cultivo convencional que son manipulados de forma manual por un usuario [3]. Este tipo de técnica utilizado por los cultivadores retrasa el progreso del cultivo debido a que realizan en tiempos y horarios innecesarios [4].

En el invernadero de cultivo de flores el sistema de riego y de fertilización que utilizan los cultivadores es controlado por un usuario de forma manual, por lo que la implementación de un sistema automatizado mejoraría la eficiencia de riego y garantizaría un suministro adecuado de los nutrientes a las plantas

Por lo tanto, con la automatización de este sistema en un invernadero de cultivo de flores es posible reducir la presencia del agricultor en el cultivo, además ayudará a mejorar la calidad del cultivo y evitar el daño ya sea por exceso o falta de agua y fertilizantes

1.2 Objetivos

1.2.1 General

Implementar un sistema automatizado de fertirrigación por goteo para mejorar el uso de agua y los nutrientes en un invernadero de flores.

1.2.2 Específicos

- Determinar los parámetros principales para la automatización del sistema de fertirrigación.
- Diseñar el sistema mecatrónico de fertirrigación
- Implementar el sistema en un invernadero de flores.
- Verificar el correcto funcionamiento del sistema de control de fertirrigación por goteo

1.3 Alcance y delimitación

El proyecto tiene como finalidad automatizar las tareas más importantes en el cultivo, como controlar el uso del agua y los nutrientes implementado un sistema automatizado permitiendo obtener producciones de calidad y con menos presencia requerida por parte del agricultor sobre el cultivo.

Este proceso puede llevarse a cabo de forma manual y automática mediante un panel de control el cual será diseñado de acuerdo a las necesidades. En el caso del sistema manual, el agricultor tendrá la capacidad de manipular el proceso, ya sea para realizar mantenimiento o para activar el sistema según sea necesario

Por otro lado, en el modo automático, esta se basará en la captura de mediciones del sensor, el procesamiento de información, la toma de decisiones y la activación de los actuadores en función de las condiciones. Para la visualización del proceso se dispondrá de una pantalla que permitirá al usuario monitorear los sistemas embebidos

La automatización de este sistema se implementará en un invernadero de flores ubicado en la parroquia Gonzales Suarez-Comunidad - Caluqui. Se utilizará una placa microcontroladora para el control y automatización del proceso, junto con sensores y actuadores

1.4 Justificación

Con la automatización del sistema que va a ser implementado en el invernadero de producción de flores se pretende optimizar el uso del agua y los nutrientes, además se busca mejorar la eficiencia del riego y garantizar un suministro adecuado de nutrientes para el cultivo, lo que permite un mayor control de plagas y enfermedades que tanto afectan a los cultivos esperando así contribuir al desarrollo de prácticas sostenibles y eficientes en la producción de flores en invernaderos mejorando así la calidad de los cultivos.

CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO

2.1 Antecedentes

En la agricultura, la automatización se ha convertido en un factor crucial para mejorar la eficiencia y la productividad de los cultivos en invernaderos [5]. Varios estudios han destacado la importancia de implementar sistemas automatizados de fertirrigación para optimizar el uso del agua y los nutrientes en la producción de cultivos, especialmente en aquellos cultivados en invernaderos [6].

La automatización de la fertirrigación en invernaderos no solo mejora la eficiencia del riego, sino que también contribuye a garantizar un suministro adecuado de nutrientes a las plantas, lo cual mejora la calidad de los cultivos. Además, resaltan que los sistemas de control automatizado permiten una gestión más precisa y oportuna de los recursos, lo que puede llevar a una reducción en los costos de producción y un aumento en la rentabilidad para los agricultores [7].

En los invernaderos, la automatización del riego y la fertirrigación se ha convertido en una herramienta clave para optimizar el uso del agua y los nutrientes. Los sistemas automatizados permiten ajustar los niveles de riego y fertilización de manera precisa, reduciendo así el desperdicio de recursos [6]

La aplicación de la automatización en la agricultura de invernadero ha sido objeto de investigación durante varias décadas, con un enfoque cada vez mayor en la optimización de la fertirrigación. [8]. Destacan que la integración de sensores en los sistemas automatizados de fertirrigación permite una monitorización en tiempo real de variables clave como la humedad del suelo, la temperatura y la conductividad eléctrica, lo que facilita una gestión más precisa de los recursos hídricos y nutricionales [9]. subrayan que la automatización no solo mejora la eficiencia

del riego, sino que también puede contribuir a la sostenibilidad ambiental al reducir el desperdicio de agua [10]

Estos hallazgos respaldan la relevancia y la viabilidad de implementar sistemas automatizados de fertirrigación en invernaderos de flores, especialmente en regiones donde el acceso al agua es limitado y la demanda de productos agrícolas de alta calidad es alta [11].

Investigaciones previas han demostrado que la automatización en la agricultura aplicando técnicas de sistemas de control automático pueden tener un impacto significativo en la productividad y la rentabilidad de los cultivos [12]. La automatización en sistemas de fertirrigación mejora la uniformidad en el suministro de agua y nutrientes, lo que se traduce en un crecimiento más homogéneo de las plantas y una mayor calidad de los productos finales, además la integración de tecnologías en fertirrigación puede optimizar la distribución de soluciones nutritivas, asegurando que las plantas reciban la cantidad adecuada de agua y nutrientes en el momento preciso [13].

2.2 Bases Teóricas

2.2.1 Automatización en la agricultura

La automatización en la agricultura ha surgido como una herramienta crucial para mejorar la eficiencia y la productividad en los sistemas de cultivo. La implementación de sistemas automatizados permite la monitorización y el control precisos de variables ambientales y procesos agrícolas, lo que puede llevar a una gestión más eficiente de los recursos hídricos y nutricionales, así como una mejora en la calidad y el rendimiento de los cultivos.

2.2.2 fertirrigación por goteo

La fertirrigación por goteo es un método de aplicación de agua y nutrientes directamente a la zona radicular de las plantas, a través del sistema de riego por goteo. Este sistema combina la irrigación y la fertilización, permitiendo una distribución uniforme de agua y nutrientes, lo que optimiza la absorción de los mismos por parte de las plantas. La fertirrigación por goteo es ampliamente utilizada en la agricultura moderna debido a su eficiencia en el uso de recursos y su capacidad para mejorar la calidad de los cultivos. En la fig.1 se muestra un esquema de un sistema de fertirrigación por goteo.



Fig. 1 Esquema de un sistema de fertirrigación por goteo

2.2.3 Principios de fertirrigación por goteo

La fertirrigación por goteo utiliza una red de tuberías conectadas a pequeños emisores que suministran agua y fertilizantes de manera controlada y precisa. Esta se filtra en el suelo formando una zona húmeda, conocida como "bulbo de humedad", que suele alcanzar una profundidad cercana a los 30 cm, garantizando que el agua y los nutrientes lleguen directamente a las raíces de las plantas [9]. Para entender esta eficiencia, es esencial conocer los principios básicos que hacen posible el funcionamiento óptimo del sistema como son:

- Distribución localizada: El agua y los nutrientes se aplican en puntos específicos cerca de las raíces.
- Control dosificado: La cantidad de agua y de fertilizantes se distribuyen en función de las necesidades de las plantas y de las condiciones del suelo.
- Adaptación a las condiciones climáticas: Los sistemas pueden ajustarse para operar eficientemente en ambientes secos o húmedos.

2.2.4 Riego por goteo

El riego por goteo es considerado uno de los sistemas más eficientes en la actualidad, ya que proporciona un suministro constante y uniforme de agua, entregándola gota a gota directamente en la zona radicular de las plantas. Esto permite mantener la humedad en condiciones óptimas y con baja tensión [14]. Fig. 2 muestra un sistema de riego por goteo.



Fig. 2 Riego por goteo [21]

En términos de eficiencia, el riego por goteo permite aprovechar entre el 90 y el 95 % del agua y los fertilizantes. El riego por goteo es bastante diferente a otros métodos de riego, por lo que es fundamental gestionarlo de manera adecuada para maximizar sus ventajas y prevenir posibles inconvenientes [15].

Ventajas

- El riego por goteo dirige el agua solo a las zonas necesarias, evitando el riego en áreas no deseadas y reduciendo la aparición de malezas. Además, al minimizar el contacto de la humedad con el follaje, tallos y frutos, ayuda a prevenir la propagación de enfermedades en los cultivos.
- Al suministrar solo la cantidad de agua necesaria para el cultivo, se consigue una distribución uniforme del riego. La aplicación frecuente de riegos con un caudal reducido mantiene un nivel óptimo de humedad en la zona radicular, favoreciendo un desarrollo equilibrado de las raíces. Además, permite una administración precisa de los nutrientes a través de la fertirrigación

Desventajas

- La inversión inicial es elevada, por lo que su implementación suele estar dirigida a cultivos de alto valor comercial. Además, no es una opción viable para cultivos con alta densidad de siembra.
- Aunque requiere poco personal para su operación, su funcionamiento es más complejo en comparación con los sistemas de riego tradicionales. Es fundamental llevar a cabo un mantenimiento regular del cabezal y las líneas de riego, ya que los emisores pueden obstruirse con facilidad, especialmente si se usa agua de baja calidad.

2.2.5 Emisores en sistemas de fertirrigación por goteo

Los emisores son componentes fundamentales en los sistemas de fertirrigación, son diseñados para liberar agua de manera controlada y localizada directamente en la zona radicular del cultivo como se muestra en la Fig. 3. Suelen instalarse a distancias que varían entre 20 y 30 cm, dependiendo de factores como la textura del suelo, el espaciamiento del cultivo y el caudal deseado, que comúnmente oscila entre 1 y 4 L/h por emisor [16]. Su propósito es garantizar una entrega uniforme tanto del agua como de los nutrientes durante la fertirrigación, minimizando



Fig. 3 Emisor de goteo [33]

considerablemente las pérdidas por evaporación y escurrimiento. Esto permite mantener una zona de humedad constante alrededor de las raíces, lo cual promueve un desarrollo balanceado de la planta y optimiza el uso del agua, mejorando además la calidad y rendimiento de la producción floral.

2.2.6 Suelo agrícola para el cultivo de flores

El cultivo de las flores debe llevarse a cabo respetando ciertos parámetros que debe de cumplir el suelo donde se realiza el cultivo, por lo que requiere suelos bien drenados para evitar acumulación de agua, con buen contenido de materia orgánica y un pH ligeramente ácido a neutro,

idealmente entre 5.5 y 6.5, para favorecer el desarrollo radicular y la absorción eficiente de nutrientes. [17]

En la Fig. 4 se muestra la escala de pH y los ejemplos de suelos a los que pertenece



Fig. 4. Escala de pH [31]

2.2.7 Fertilización

La fertilización en el cultivo de flores es clave para asegurar un desarrollo óptimo y una floración de calidad. Es necesario suministrar una combinación equilibrada de macronutrientes como nitrógeno, fósforo y potasio, junto con micronutrientes esenciales, adaptando la aplicación según las necesidades del suelo y la etapa de crecimiento. La fertirrigación es una técnica eficiente para distribuir los nutrientes de manera uniforme y mejorar su absorción. Además, es fundamental realizar análisis periódicos del suelo para ajustar las dosis de fertilización y evitar excesos que puedan afectar la salud de las plantas. [18]

2.2.8 Equipo de aplicación de fertilizantes

Los equipos de aplicación de fertilizantes son herramientas que se utilizan para distribuir fertilizantes en los cultivos. Estos equipos pueden ser manuales o mecanizados en la fig.5 se puede observar un tanque de fertilización manual

2.2.9 Tanque de fertilización manual

Un tanque de fertilización en paralelo se conecta a la línea principal del sistema de riego, aprovechando su presión y caudal para disolver y mezclar el fertilizante antes de incorporar al agua de riego. Estos tanques pueden ser horizontales o verticales y están disponibles en materiales como polietileno o acero galvanizado. Para regular la cantidad de fertilizante suministrado, se emplean válvulas de control de caudal. En la fig. 5 se puede observar el proceso de fertilización de forma convencional en cual se aprovecha la fuerza de la gravedad para permitir el paso de los fertilizantes desde un tanque elevado sin la intervención de equipos automatizados



Fig. 5 Tanque de fertilización manual

2.2.10 Inyector Venturi

El sistema Venturi es un mecanismo de inyección de fertilizantes basado en el principio de reducción de presión por aumento de velocidad del fluido al atravesar un estrechamiento en la tubería. Este fenómeno genera una presión negativa que permite la succión y dosificación controlada de fertilizantes, optimizando su integración en el agua de riego. Su diseño está compuesto por dos embudos conectados en su punto más estrecho, esto lo hace altamente eficiente para su aplicación en sistemas de fertirrigación por goteo. Además, la regulación del caudal de inyección se gestiona mediante caudalímetros que permiten un ajuste preciso del flujo de productos químicos en el sistema de riego. En la fig.6 se puede visualizar el proceso del sistema de inyección Venturi

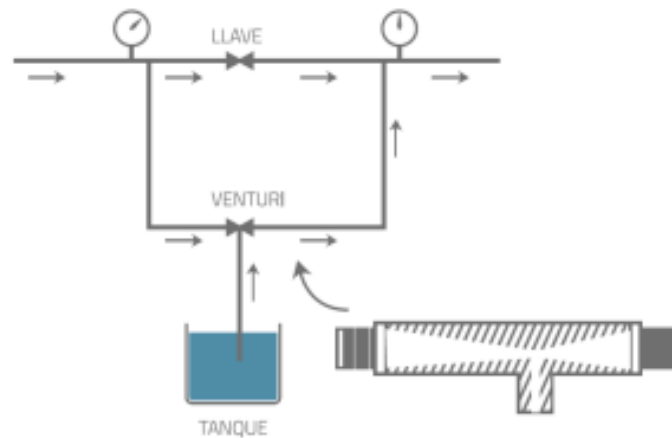


Fig. 6 Proceso de inyección Venturi.

2.2.11 Bomba hidráulica

Este método utiliza una bomba accionada por la presión del agua o mediante un motor para inyectar fertilizante de manera controlada y precisa en el sistema de riego. Existen diferentes tipos

de bombas, como las de diafragma, pistón o centrífugas, que permiten regular la cantidad exacta de fertilizante aplicado.

La Fig.7 muestra un sistema de aplicación de fertilizante mediante un inyector hidráulico. Este proceso es ideal en cultivos de alto valor, ya que garantiza una dosificación uniforme y ajustable según la necesidad del cultivo

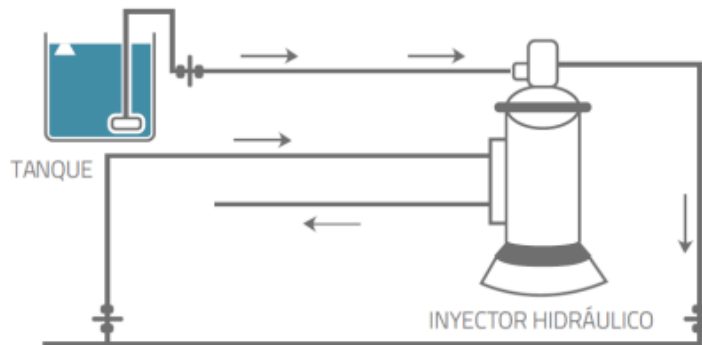


Fig. 7 Proceso de inyección hidráulico

2.2.12 Sensores y actuadores

Los sensores y actuadores son componentes clave en los sistemas automatizados de fertirrigación. Los sensores se utilizan para medir variables como la humedad del suelo, la temperatura ambiente, la conductividad eléctrica y el pH del suelo, proporcionando datos en tiempo real sobre las condiciones del cultivo y el entorno. Por otro lado, los actuadores son dispositivos que permiten controlar el flujo del agua y nutrientes según las necesidades de las plantas.

CAPÍTULO III: MARCO METODOLÓGICO

3.1 Enfoque y tipos de investigación

Para el desarrollo de la investigación sobre la automatización del sistema de fertirrigación por goteo en invernaderos de flores, se utilizó enfoques de investigación orientados a una investigación aplicada; la cual está dirigida a la resolución de un problema. Para identificar todos los aspectos referidos al problema fue necesario realizar investigación de campo. A través de esta orientación fue posible conocer los requerimientos del sistema de fertirrigación. Así mismo, se ha desarrollado investigación documental. Específicamente, de acuerdo con los objetivos del problema la revisión de antecedentes estuvo orientada a recopilar información sobre sistemas de fertirrigación automatizados y tecnologías disponibles. Esta revisión permitió establecer una base teórica sólida para el desarrollo del proyecto, identificando los componentes claves, metodologías de automatización y parámetros relevantes como el pH del suelo y la dosificación de fertilizantes. Por otra parte, se aplica la investigación descriptiva esto implica observar detalladamente el comportamiento del sensor y la respuesta del sistema ante distintos niveles de humedad y pH, y qué tan eficiente es ante el riego manual tradicional, así mismo mediante la recopilación de datos y el análisis de su desempeño, se obtiene una visión clara de su impacto en la optimización del riego y el uso de fertilizantes.

Finalmente, en la realización de pruebas de funcionamiento se lleva a cabo un procedimiento de investigación experimental en donde se realiza pruebas experimentales en condiciones reales. Esto significa que se ponen a prueba distintas configuraciones, ajustando variables como los tiempos de activación de las electroválvulas, la calibración del sensor y la cantidad de fertilizante administrado. Estas pruebas permiten validar el correcto funcionamiento

del sistema, identificando posibles oportunidades de mejora para optimizar su desempeño y garantizar una fertirrigación eficiente y completamente automatizada en el invernadero.

3.2 Diseño de la Investigación

3.2.1. Fase 1: Determinación de los parámetros principales

Actividad 1.1: Registro de parámetros relevantes; Se lleva a cabo una revisión bibliográfica exhaustiva para identificar y registrar los parámetros principales relacionados a la automatización en los cultivos. Estos parámetros incluyen aspectos técnicos, ambientales y de cultivo, relevantes para la automatización.

Actividad 1.2: Recopilación de datos; Se recopilan datos sobre la automatización en los cultivos. Esta actividad permite identificar las mejores prácticas y técnicas para dicha automatización.

Actividad 1.3: Entrevista con productores locales; Se realizan entrevistas con productores de flores para comprender sus necesidades específicas con respecto a la automatización del sistema de fertirrigación en invernaderos. Estas entrevistas proporcionan información valiosa para adaptar el diseño del sistema a las condiciones locales y las preferencias de los agricultores

3.2.2. Fase 2: Diseño del sistema de fertirrigación automatizado

Actividad 2.1: Determinación de los parámetros de diseño; Se analizan los datos recopilados en la fase anterior, para determinar los parámetros de diseño del sistema de fertirrigación automatizado. Estos parámetros incluyen especificaciones técnicas, requisitos de rendimiento y consideraciones ambientales

Actividad 2.2: Diseño detallado del sistema; Se realiza un diseño detallado del sistema de fertirrigación automatizado, que incluye las especificaciones de los componentes, la elaboración de diagramas técnicos y la planificación de la integración de equipos.

3.2.3. Fase 3: Validación del sistema mediante simulación y pruebas

Actividad 3.1: simulación del sistema; se utiliza un software de simulación para construir un modelo virtual del sistema para luego proceder con su respectiva implementación en el invernadero

Actividad 3.2: Pruebas y resultados; se instala el sistema en el invernadero para realizar pruebas y verificar su correcto funcionamiento. Así mismo, se registran los datos de cada prueba evaluando la estabilidad de la conexión y el tiempo de respuesta del sistema, hasta alcanzar el funcionamiento apropiado.

CAPITULO IV: RESULTADOS Y ANALISIS

4.1 Especificaciones del sistema

El sistema de fertirrigación por goteo ha sido diseñado para optimizar el riego en un invernadero de flores, garantizando una aplicación eficiente del agua y los fertilizantes. Las principales especificaciones incluyen:

- **Modo de operación:** Se ha implementado dos modos: manual y automático, permitiendo al usuario flexibilidad según las condiciones de cultivo.
- **Microcontrolador:** Se utiliza la ESP32, un microcontrolador adecuado que permite la automatización eficiente para estos sistemas.
- **Sensores:** Se incluye un sensor de pH para garantizar un control preciso del riego y la nutrición de las plantas.
- **Actuadores:** Se utiliza Electroválvulas para el control del flujo de los fertilizantes para asegurar una distribución eficiente.
- **Interfaz de usuario:** Se incluye una pantalla LCD que permite visualizar información en tiempo real, mientras que un selector facilita la selección de modos de operación.

4.2 Diseño del sistema

El diseño del sistema se fundamenta en la necesidad de disponer de un sistema de fertirrigación automatizado y eficiente. Se estructura en módulos interconectados que permiten una gestión inteligente del suministro de agua y fertilizantes. Se ha incorporado un sensor de pH de suelo para evaluar en tiempo real las condiciones de acidez del sustrato de manera que la

activación del sistema de la adición de fertilizantes sea precisas y oportunas. Además, el interfaz de usuario proporciona información clara sobre el estado del sistema, facilitando su operación.

En la Fig.7 se detalla la composición del sistema de fertirrigación

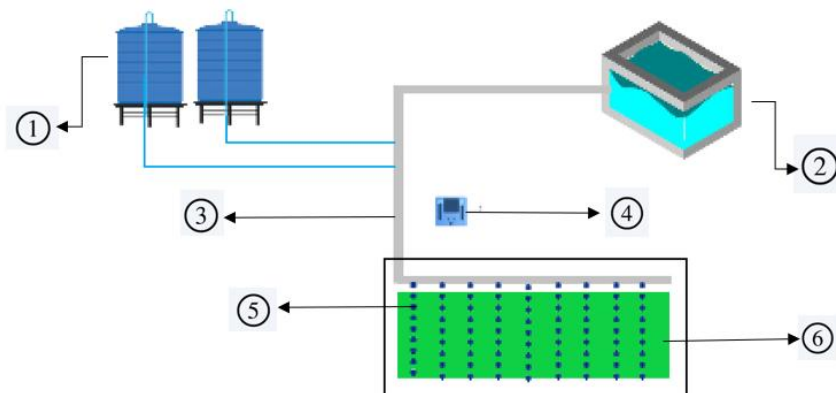


Fig. 8 Esquema de sistema fertirrigación planteado

Tabla 1. Componentes del sistema de fertirrigación.

Nº	Descripción	Función
1	Recipiente de mezcla nutritiva	Fertilizantes
2	Cisterna de agua	Depósito de agua
3	Tubería principal	Transporte principal de agua y nutrientes
4	Controlador de fertirrigación	Controla el sistema de fertirrigación
5	Línea de goteo	Distribuye agua a las plantas
6	Cama de cultivo	Zona dedicada al cultivo

4.2.1 Criterios y restricciones

El sistema gestiona automáticamente la fertilización de la sección del invernadero en función de los datos de pH del suelo por lo cual asegura una fertilización eficiente y evita el uso

excesivo de agua y nutrientes. Para ello se presenta algunos criterios y restricciones acerca el sistema

1. La solución propuesta permite cambiar entre operación manual y automática mediante un control, el cambio se lo realiza mediante una perilla en el sistema de control
2. Se mantiene el costo dentro de los límites permitidos para los componentes electrónicos
3. El sistema permite la adición de más sensores o actuadores en caso de que el invernadero se expanda o requiera mejoras.
4. El sistema es capaz de responder en tiempo real a los cambios en los niveles de pH
5. El sensor de pH tiene un margen de error pequeño para asegurar la precisión en la aplicación de riego y nutrientes.

4.3 Descripción del espacio productivo

En la Fig. 8 se visualiza las dimensiones correspondientes al área de producción, expresadas en metros

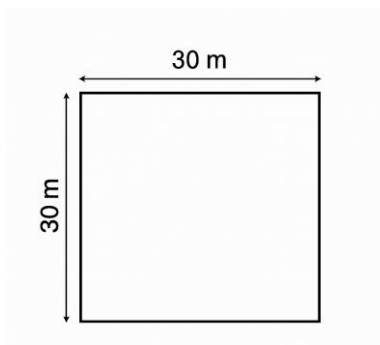


Fig. 9 Dimensión del área de producción

El método de fertirrigación que se encuentra empleado en el invernadero de flores es por goteo, utilizan un sistema convencional basado en la fuerza de gravedad para la distribución de los fertilizantes. La eficiencia de este sistema es de alta calidad ya que transporta los nutrientes y el agua directamente a la raíz de las plantas sin generar desperdicios.

4.4 Elementos que conforman la red de fertirrigación.

4.4.1 Línea de distribución principal

La línea de distribución principal es una tubería de dimensión 1 1/2"(Pulgadas), inicia desde la cisterna de agua y va hacia la sección del invernadero.

4.4.2 Línea de distribución secundaria

Las líneas de distribución secundarias están ubicadas en las camas del cultivo, son tuberías de riego por goteo tiene un diámetro de 16 mm, con goteros espaciados a intervalos de 30 cm

4.4.3 Número de camas en la sección

La sección del cultivo cuenta con 25 camas

4.4.4 Longitud de la cama

La longitud de cada cama es de 28 metros

4.5 Diseño hidráulico

Determinar los caudales necesarios, la presión que debe mantener el sistema, las dimensiones de las tuberías y las válvulas, garantiza que el sistema suministre agua y fertilizante de manera uniforme a toda la sección del cultivo sin fallos.

En la Fig. 10 se muestra el esquema de tubería del sistema de fertirrigación que cuenta la florícola, tomando en cuenta que el depósito de fertilizante se encuentra a una altura de 3 m sobre el suelo, así mismo el agua que se usa es de una cisterna que esta almacenada con agua.

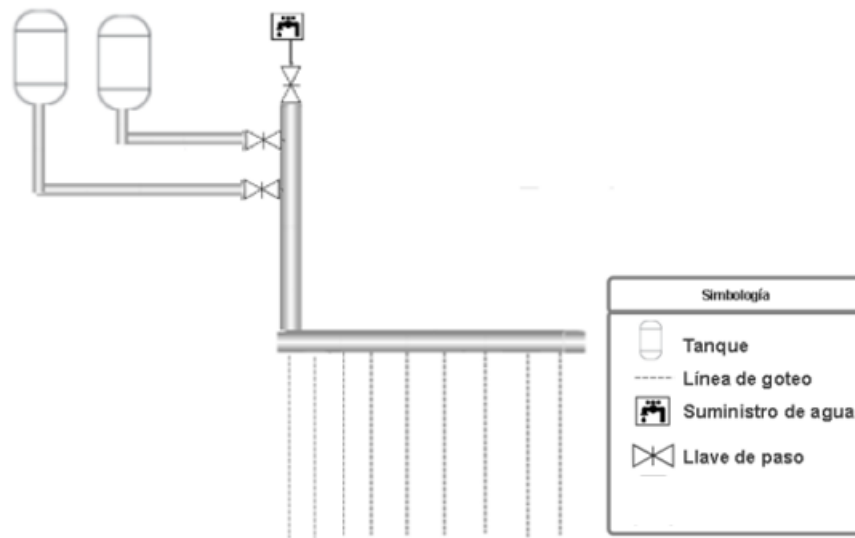


Fig. 10 Esquema de la red de tuberías del sistema

4.5.1 Líneas de goteo

Es el elemento clave del sistema de fertirrigación, se trata de mangueras flexibles con orificios distribuidos a cierta distancia la cual liberan agua en forma de gota cuando reciben presión.

Tabla 2. Características de la línea de goteo [19]

Código	Diámetro(mm)	Presión(bar)	Caudal (l/h)
IRT160510-52	16	0,25-1,00	0,75-1.41

4.6 Cálculo de pérdidas de carga en el sistema

Se calcula la pérdida de carga total que se produce en el sistema de fertirrigación, considerando todos los elementos hidráulicos que lo conforman, como tuberías principales, accesorios (válvulas, reducciones) y mangueras de líneas de goteo. El floricultor recomienda utilizar como tubería principal una manguera de polietileno de alta densidad (PEAD) con un

diámetro nominal de 1 ½”, por sus propiedades de resistencia y durabilidad, estas siendo diseñadas para soportar hasta 60 psi de presión ($\approx 413,7$ kPa).

Para realizar este análisis, se utiliza un caudal de diseño de 35 L/min ($0,000583$ m³/s), que corresponde al caudal máximo que puede entregar la bomba. Ver anexo A. De este modo, se asegura que el diseño sea capaz de funcionar correctamente en las condiciones más exigentes de operación.

Como se observa en la Figura 11, el sistema está conformado por cuatro tramos diferenciados. El Tramo 1 y el Tramo 2 corresponden a líneas de conducción de salida simple. El Tramo 3 funciona como una línea secundaria de salida múltiple, encargada de distribuir el caudal hacia las distintas líneas de riego. Finalmente, el Tramo 4 está conformado por las líneas de goteo, responsables de la aplicación directa de nutrientes al cultivo

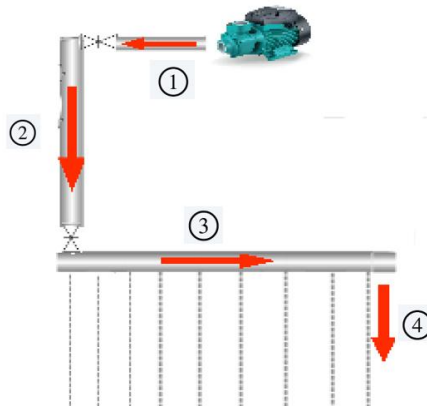


Fig. 11 Tramos de circulación para el cálculo de perdidas

Tabla 3.Calculo de perdidas por fricción

Tramo	Longitud (m)	Diámetro (m)	Área (m²)	Velocidad	Perdida por fricción (m)
1	3	0.0254	0.000507	1.15	0.170
2	6	0.0381	0.00114	0.51	0.023
3	27	0.0381	0.00114	0.51	0.104
Total	-	-	-	-	0.297

Ecuaciones utilizadas:

$$v = \frac{Q}{A} \quad (1) [20]$$

Donde:

v: velocidad del flujo de agua dentro de la tubería (m/s)

Q: caudal volumétrico del sistema (m³/s) = 35 L/min (0,000583 m³/s). ver anexo A

A: área interior de la tubería (m²)

$$A = \frac{\pi D^2}{4} \quad (2) [20]$$

Donde:

A: área interior de la tubería (m²)

π: constante ≈ 3.1416

r: radio interior de la tubería

$$hf = fx \frac{L}{D} x \frac{v^2}{2g}$$

(3) [20]

Donde;

hf: pérdida de carga por fricción en la tubería (m)

f: factor de fricción (para Tubería PEAD $\approx 0,022$) [20]

L: longitud de la tubería (m)

D: diámetro interior de la tubería (m)

v: velocidad del agua (m/s)

g: gravedad ($\approx 9,81$ m/s²)

Tabla 4 Perdida de carga en accesorios

Accesorio	Tipo	K	Velocidad (m/s)	Pérdida localizada (m)
Reducción 1" a 1.5"	Reducción	0.10	1.15	0.0067
Válvula de paso	Bola (abierta)	0.05	0.51	0.0007
Válvula de paso	Bola (abierta)	0.05	0.51	0.0007
Total	-	-	-	0.0081

Ecuación utilizada:

$$hs = k \frac{v^2}{2g}$$

(4) [20]

Donde:

hs: pérdida de carga localizada

K: coeficiente de pérdida del accesorio,

v: velocidad del flujo de agua en el accesorio (m/s)

g: aceleración de la gravedad $\approx 9,81 \text{ m/s}^2$

Tabla 5. Cálculo de pérdida de carga de la línea de goteo

Elemento	Diámetro (m)	Longitud (m)	Velocidad (m)	Coef.fricción	Perdida (m)
Línea de goteo	0.016	28	0.058	0.03	0.017

Para el cálculo de las pérdidas de carga en las líneas de goteo, se considera el número total de líneas instaladas en el invernadero, que en este caso es de 50. De esta forma, se determina el caudal que corresponde a cada línea de goteo. Véase la ecuación (4).

$$Q_{por\ línea} = \frac{Q_{total}}{50} = \frac{0.583L/s}{50} = 0.1166 \frac{L}{s} = 1.166 \times 10^{-5} \text{ m}^3/s \quad (4) [20]$$

Una vez determinado el caudal correspondiente a cada línea de goteo, se aplican las ecuaciones (1), (2) y (3) para calcular la pérdida de carga que se produce a lo largo de cada línea, considerando factores como el diámetro interior, la longitud de la tubería, el caudal y las características del material.

Para este cálculo, se adopta un factor de fricción $f=0,03$ [21], valor habitual utilizado para mangueras de líneas de goteo de pequeño diámetro utilizados en sistemas de fertirrigación por goteo

Tabla 6 Pérdidas totales del sistema de fertirrigación

Tramo	Pérdidas (m)
1	0.170
2	0.023
3	0.104
4 (líneas de goteo)	0.017
Accesorios (válvulas, reducción)	0.0081
Total	0.3221

Tras el desarrollo del análisis del cálculo de pérdidas de carga en el sistema de fertirrigación, se determinó que la pérdida total de la carga es de 0.3221 metros. Este valor incluye las pérdidas por fricción en la manguera principal, las pérdidas localizadas generadas por los accesorios instalados (como válvulas de paso y reducciones), y la correspondiente a la línea de goteo

Para los cálculos se utilizó un caudal de diseño de 35 L/min (0,000583 m³/s), correspondiente al máximo caudal entregado por la bomba, y se adoptó un coeficiente de fricción $f=0,03$, valor representativo para mangueras de goteo de pequeño diámetro fabricadas en polietileno

Estos resultados confirman que el sistema mantiene la presión suficiente para garantizar un reparto homogéneo del agua y de los nutrientes a lo largo de todas las líneas de goteo, asegurando la eficiencia y la calidad de la producción en el invernadero de flores.

4.7 Selección de materiales y componentes

En la selección de materiales y componentes que incluye el sistema de fertirrigación se llevó a cabo mediante una matriz morfológica en la cual se comparan diferentes opciones de sensores, válvulas, microcontroladores y otros elementos, considerando criterios claves como compatibilidad, consumo energético y resistencia a condiciones ambientales adversas. Posteriormente se aplica un método de ponderación de criterios, asignando valores a cada opción en función de su desempeño en relación con los requisitos del sistema en lo cual permite seleccionar la combinación más óptima de componentes, garantizando un equilibrio entre rendimiento, costo y facilidad de integración.

4.8 Matriz morfológica.

En la tabla 7 se presentan las distintas opciones de solución para la automatización del sistema de fertirrigación

Tabla 7. Matriz morfológica

Función	Componentes		
Control de flujo	válvula solenoide acero inoxidable	válvula solenoide plástica 12V DC	Válvula de bola motorizada 12V DC
Medición de pH	Sensor de pH	Electrodos de pH	Medidor de pH digital
Control del sistema	Arduino UNO	ESP32	Rasberry Pi
Interfaz visual	Pantalla TFT	Pantalla GLCD 128X64	Pantalla LCD 16x4

Alternativa 1, línea roja: Esta solución emplea tecnología avanzada, pero con un costo elevado y una implementación más compleja. La válvula solenoide de acero inoxidable garantiza alta resistencia a soluciones de fertilizantes, pero su costo y su consumo energético es considerado demasiado mayor en comparación con las demás válvulas. El medidor de pH digital proporciona datos confiables, pero su costo es considerablemente mayor en comparación con otros sensores de pH. La Raspberry Pi, aunque es potente, está diseñada para aplicaciones más exigentes, lo que la convierte en una opción innecesariamente robusta para este sistema, generando un mayor consumo energético y un costo superior. La pantalla TFT ofrece una interfaz gráfica avanzada con imágenes en color, pero su implementación en este tipo de aplicación no aporta beneficios significativos.

Alternativa 2, línea verde: La válvula solenoide plástica de 12V DC es una opción económica y funcional para sistemas de fertirrigación, es compatible con microcontroladores y su bajo consumo energético lo convierte en una solución práctica. El sensor de pH de suelo proporciona mediciones precisas y es una alternativa confiable sin incurrir en costos elevados. La ESP32 se destaca por su capacidad de procesamiento, bajo consumo energético y conectividad inalámbrica, permitiendo futuras ampliaciones del sistema sin necesidad de hardware adicional. La pantalla LCD 16x4 ofrece una visualización clara de los parámetros monitoreados, evitando el uso de pantallas más complejas que incrementarían el costo y la demanda energética sin aportar ventajas significativas.

Alternativa 3, línea azul: La válvula de bola motorizada de 12v DC es ideal para controlar el flujo de los fertilizantes, sin embargo, su implementación requiere un control más preciso y presenta un mayor tiempo de respuesta. Los electrodos de pH pueden proporcionar

lecturas adecuadas, pero requieren mantenimiento y calibraciones frecuentes para evitar desviaciones en la medición. El Arduino UNO es una placa confiable y fácil de programar, pero tiene menor capacidad de procesamiento, lo que limita futuras mejoras en el sistema. La pantalla GLCD 128x64 permite mostrar información gráfica, pero su implementación es más compleja y el consumo de recursos de energía es alta.

4.9 Selección de alternativas

Para elegir la opción más adecuada, se aplica el método de criterios ponderados, el cual permite comparar cada alternativa en función de distintos aspectos clave. Esta evaluación se realiza mediante una tabla, en la que se asignarán puntajes según la importancia de cada criterio en relación con los demás:

- Se otorga un 1 cuando el criterio de la fila es más relevante que el de la columna.
- Se asigna un 0.5 si ambos tienen la misma importancia.
- Se coloca un 0 si el criterio de la columna es más significativo que el de la fila.

Una vez asignados los valores, se suman los resultados y se agrega una unidad extra para evitar que algún criterio quede con valor cero. Finalmente, en otra columna, se calcularán los valores finales de cada criterio, permitiendo así determinar la alternativa más adecuada con base en un análisis objetivo.

Para esta investigación, se han definido los siguientes criterios clave:

- Durabilidad: Se evalúa la vida útil estimada de los componentes y su resistencia a las condiciones de uso.
- Costo: Se analiza el valor económico de cada elemento, considerando su relación calidad-precio.

- Precisión de la medición: Se tiene en cuenta qué tan exactas y confiables son las lecturas proporcionadas por los sensores.
- Capacidad de procesamiento: Se revisa la memoria y el rendimiento de la tarjeta utilizada para gestionar los datos del sistema

A continuación, se presenta la evaluación de los criterios utilizados en la selección de la mejor alternativa:

4.9.1 Análisis de la ponderación para cada criterio

Tabla 8. Análisis de la ponderación para cada criterio

Criterio	Vida útil	Costo	Precisión en la medición	Capacidad de procesamiento	$\Sigma + 1$	Ponderación
Vida útil	-	1	0	0.5	2.5	0.25
Costo	0.5	-	0.5	0.5	2.	0.2
Precisión en la medición	1	0.5	-	1	3.5	0.35
Capacidad de procesamiento	0.5	0.5	0	-	2	0.2
				Suma	10	1

A partir de los datos obtenidos en la tabla 8, se puede concluir que la precisión en la medición es el criterio más relevante dentro de la selección, ya que influye directamente en la calidad de los datos obtenidos. En segundo lugar, se encuentra la vida útil, dado que es un factor determinante en la viabilidad del sistema. Finalmente, los criterios de costo y capacidad de procesamiento presentan el mismo peso, lo que indica que, si bien son importantes, su impacto en la decisión final es menor en comparación con los otros factores.

4.9.2 Análisis de la ponderación de criterio de vida útil

Tabla 9. Análisis de la ponderación de criterio de vida útil.

Vida útil	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3	$\Sigma + 1$	Ponderación
Alternativa 1	-	0	0	1	0.167
Alternativa 2	1	-	1	3	0.5
Alternativa 3	1	0	-	2	0.333
			Suma	6	1

En la tabla 9, de análisis de ponderación de criterio de vida útil, la alternativa 2 obtiene la mayor ponderación en comparación con las alternativas 1 y 3. Esto demuestra que la alternativa 2 tiene una vida útil superior.

4.9.3 Análisis de la ponderación de criterio de costo

Tabla 10. Análisis de la ponderación de criterio de costo

Costo	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3	$\Sigma + 1$	Ponderación
Alternativa 1	-	0	0	1	0.167
Alternativa 2	1	-	0.5	2.5	0.417
Alternativa 3	1	0,5	-	2.5	0.417

Suma	6	1
-------------	---	---

Al analizar la ponderación de criterio de costo que se muestra en la tabla 10, la Alternativa 3 y 2 obtiene la misma ponderación, lo que significa que son las opciones más accesibles económicamente en comparación con la Alternativa 1.

4.9.4 Análisis de ponderación de criterio de precisión en la medición

Tabla 11. Análisis de ponderación de criterio de precisión en la medición

Precisión en la medición	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3	$\Sigma + 1$	Ponderación
Alternativa 1	-	0	1	2	0.333
Alternativa 2	1	-	1	3	0.5
Alternativa 3	0	0	-	1	0.167
			Suma	6	1

Al analizar la ponderación de criterio de la precisión en la medición que se muestra en la tabla 11, nos indica que la Alternativa 2 tiene la mayor ponderación frente a las otras opciones. Esto indica que el sensor ofrece una medición más confiable y estable, garantizando un mejor control del sistema de fertirrigación.

4.9.5 Análisis de ponderación de criterios de capacidad de procesamiento

Tabla 12. Análisis de ponderación de criterio de la capacidad de procesamiento

Capacidad de procesamiento	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3	$\Sigma + 1$	Ponderación
Alternativa 1	-	1	1	3	0.5
Alternativa 2	0	-	1	2	0.333
Alternativa 3	0	0	-	1	0.167
			Suma	6	1

De la tabla 12, se concluye que la Alternativa 1 obtiene la mayor ponderación en la capacidad de procesamiento. Esto significa que cuenta con un hardware más potente, lo que permite realizar tareas más complejas. Sin embargo, este nivel de procesamiento puede ser innecesario para el sistema y generar un mayor consumo energético.

4.9.6 Cálculo de análisis de las alternativas según criterios

Tabla 13. Cálculo de análisis de solución según criterios

Criterios	Vida útil	Costo	Precisión en la medición	Capacidad de procesamiento	Σ	Prioridad
Alternativa 1	0.167	0.167	0.333	0.5	1.167	3
Alternativa 2	0.5	0.417	0.5	0.333	1.75	1

Alternativa 3	0.333	0.417	0.167	0.167	1,084	2
	1	1	1	1	4	

Con los cálculos realizados en la tabla mediante el análisis de la ponderación de criterios para cada alternativa se obtuvo los siguientes datos que se muestran en la tabla 13, donde indica que la Alternativa 2 tiene mayor prioridad en comparación con las demás alternativas. De esta forma se concluye que la Alternativa 2 es la más adecuada para el desarrollo de este proyecto.

4.10 Especificación de los componentes

4.10.1 ESP32



Fig. 12 Placa Microcontrolador ESP32 [15]

El ESP32 tiene un procesador de doble núcleo, más rápido y eficiente que microcontroladores como el Arduino Uno. Esto es útil para manejar múltiples sensores y actuadores simultáneamente sin perder rendimiento.

Tabla 14. Características de la ESP32 [22]

Microcontrolador	ESP32
Procesador	Tensilica Xtensa LX6 32 bit Dual.Core a 160 MHz (hasta 240 MHz)
Memoria Ram	520 KB
Memoria flash	Hasta 16 MB
ROM	448 KB
Alimentación	2.2 A 3.6 V
Rango de temperatura	-40°C A 125°C
Consumo de corriente	80 mA(promedio). 225 mA Máximo
Wifi	802.11b/g/h (hasta + 20 dBm) WEB, WAP
Bluetooth	V4.2 BR/EDR y BLE
PWM	16
ADC	18(12 bit)
DAC	2(8 bit)

4.10.2 Válvula Solenoide plástica 12V DC



Fig. 13 Válvula solenoide [23]

La electroválvula solenoide de diseño reducido opera a través de controladores automatizados. Aunque su funcionamiento principal es con corriente continua. Este componente es esencial en la automatización, ya que controla el flujo de agua con precisión, optimizando el uso de los recursos hídricos.

Tabla 15. Características de la válvula solenoide [23]

Tensión	DC 12V
Corriente	0.6 A
Potencia	8W
Presión	0.08 a 0.8 mPa
Temperatura máxima de fluido	100 °C
Material	Metal y plástico

4.10.3 Sensor de pH del suelo



Fig. 14 Sensor de pH de suelo [25]

El sensor de suelo tiene alta precisión, velocidad de medición rápida, salida estable y puede usarse ampliamente en varios suelos. La carcasa del sensor adopta un encapsulado al vacío, grado de protección IP68, puede enterrarse en el suelo durante mucho tiempo, puede soportar la electrólisis y la corrosión a largo plazo.

Tabla 16.Características del sensor de pH [24]

Marca	Sensor de pH del suelo RS485
Fuente de alimentación	5-30 VCC
Consumo máximo de energía	0.5 W
Rango de medición	3-9 PH
Temperatura de funcionamiento	-20°C-60°C
Estabilidad a largo plazo	≤5 %Año
Tiempo de respuesta	≤10 s
Nivel de protección	IP68
Material de la sonda	Electrodo especial anticorrosión
Material de sellado	Resina epoxi negra retardante de llama
Señal de salida	RS485/4~20 mA/0~5 V/0~10 V
Dimensiones	45*15*123 mm

4.10.4 Pantalla LCD 16x4 Con I2C



Fig. 15 Pantalla LCD [26]

Es un tipo de pantalla de cristal líquido (LCD, por sus siglas en inglés) que tiene una matriz de 16 columnas por 4 filas de caracteres. Se utilizan comúnmente en aplicaciones donde se requiere mostrar texto alfanumérico, como en sistemas de control, dispositivos de medición, instrumentación, paneles de control, entre otros. La capacidad para mostrar hasta 16 caracteres por línea y 4 líneas en total permite presentar información de manera clara y concisa en un formato relativamente compacto.

Tabla 17. Características de la pantalla LCD 16x4 [25]

Dimensiones totales	87x60x13.5 mm
Alimentación	5V
Modo de interfaz	Puerto paralelo
Área de visión	61.8x25.2 mm

4.10.5 Bomba de agua periférica Leo APm37



Fig. 16 Bomba periférica [19]

La bomba de agua periférica Leo APm37 cuenta con un motor monofásico de 1/2 HP y es adecuada para servicio continuo. Está construida con cuerpo de hierro fundido con tratamiento anticorrosivo, eje de acero inoxidable e impulsores de bronce con sistema antibloqueo. Tiene protección IPX4, soporta hasta 60 °C y alcanza una altura máxima de elevación de 70 metros con un caudal mínimo de 5 litros por minuto. Es ideal para sistemas de riego, trasvase de agua entre depósitos.

Tabla 18. Características de la Bomba periférica [26]

Marca	LEO
Modelo	APm37
Potencia	½ HP
Tensión	110V monofásica
Succión y descarga	1" x 1"
Caudal mínimo/ altura máxima	5.0 L/Min x 70 Metros
Caudal optimo/altura optimo	25 L/Min x 35 Metros
Caudal máximo/altura mínima	50 L/Min x 5.0 Metros

4.11 Esquema electrónico del sistema de fertirrigación

Para garantizar una integración eficiente de los diferentes componentes del sistema de fertirrigación automatizado, se ha elaborado un esquema eléctrico detallado. Para la elaboración del diagrama se hace el uso de un simulador de circuito llamado Tinkercad en la cual nos ayuda a simular y a corregir fallos en la conexión, en la Fig.17 se ilustra la disposición de los componentes y su conexión electrónica.

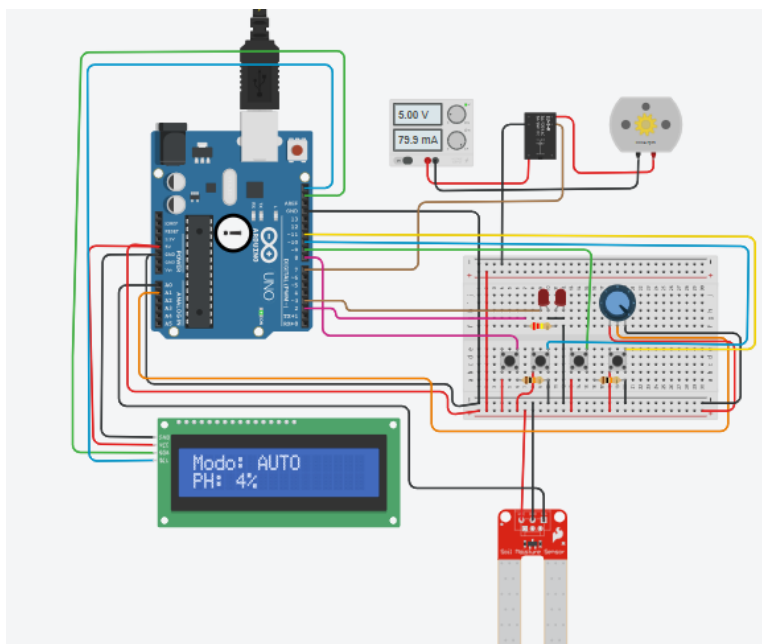


Fig. 17 Esquema electrónico

4.12 Diagrama de bloque

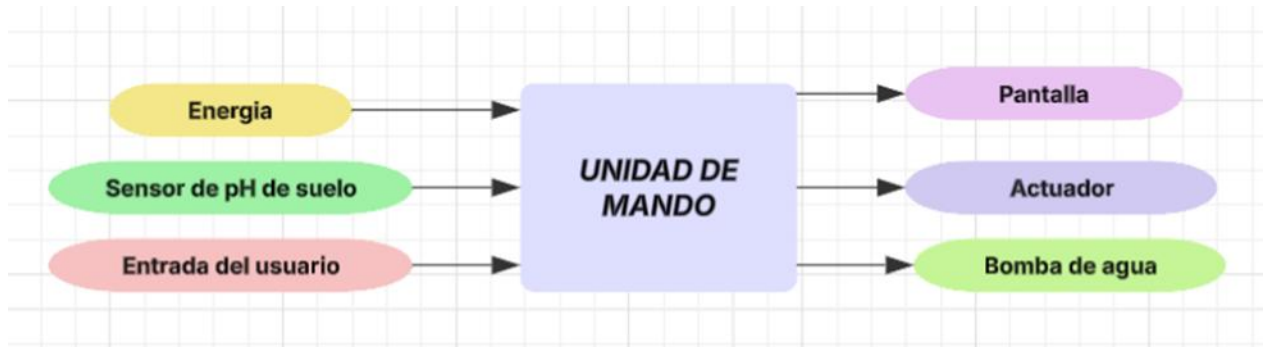


Fig. 18 Diagrama de bloque del sistema

4.13 Programación del sistema

El desarrollo de la programación es una parte fundamental para el desarrollo de la automatización del sistema de fertirrigación, ya que permite automatizar el proceso de riego y fertilización según las condiciones del suelo. Para ello, se realiza un diagrama de flujo con el fin de obtener un desarrollo estructurado y eficiente del programa, asegurando así que el sistema responda de manera óptima en cada uno de sus modos de operación.

4.14 Diagrama de flujo

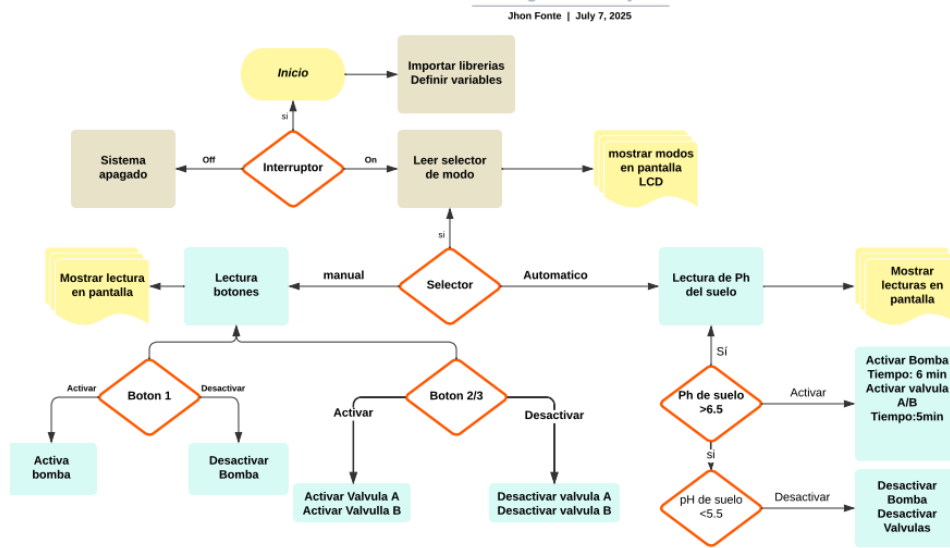


Fig. 19 Diagrama de flujo del sistema de fertiirrigación

4.15 Construcción e implementación

4.15.1 Instalación del sistema eléctrico

La instalación eléctrica del sistema se lleva a cabo tomando como fuente principal la red de distribución de 110 V, desde la cual se realiza el tendido eléctrico hasta la ubicación destinada para el tablero de control y la bomba de riego. En la Fig.20 se puede observar los cables que son tomados de la red principal y tendidos hasta el gabinete de control.



Fig. 20 cables de la red principal para el tablero

4.15.2 Implementación del sensor Soil PH-S (RS485).

El sensor transmite los datos a través del protocolo de comunicación RS485 lo que permite una comunicación confiable a larga distancia y en entornos con interferencias. El cableado del sensor de pH de suelo al gabinete de control instalado tiene una distancia a de 5 metros.



Fig. 21 Implementación del señor de pH de suelo

4.15.3 Instalación de la electroválvula

Para la instalación de las electroválvulas se retira las válvulas de manipulación manual para ser reemplazadas por electroválvulas controladas electrónicamente.



Fig. 22 Válvulas manuales



Fig. 23 Electroválvulas instaladas

4.15.4 Montaje del motor eléctrico

Para el montaje del motor eléctrico se selecciona una base adecuada y firme para minimizar vibraciones durante el funcionamiento. Posteriormente se realiza la conexión eléctrica en la cual se incorpora dispositivos de protección contra sobre corriente en donde garantiza su funcionamiento seguro.



Fig. 24 Implementación del motor eléctrico

4.15.5 Implementación del gabinete de control

Se coloca un gabinete en el sitio adecuado del invernadero donde se lleva a cabo el ensamblaje y la integración de los componentes electrónicos correspondientes al sistema de control y potencia del proyecto.

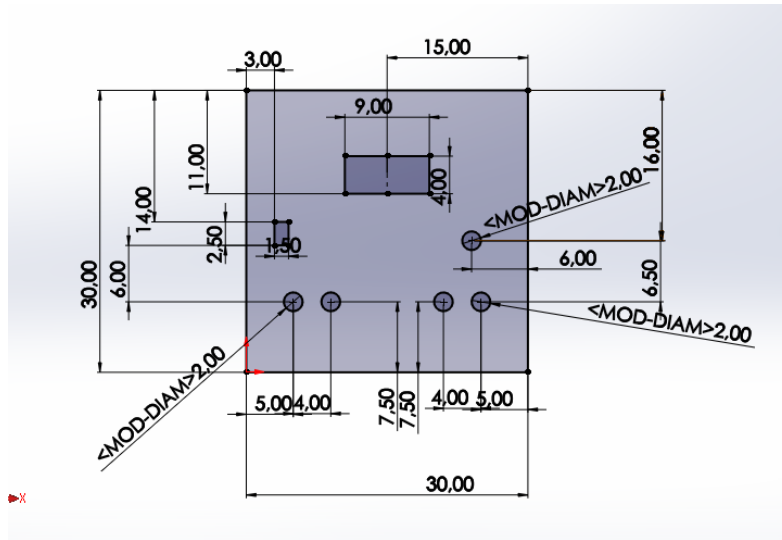


Fig. 25 Diseño del panel frontal del gabinete



Fig. 26 Preparación para el ensamblaje del panel frontal del gabinete

4.15.6 Panel de control

En la parte de panel de control se integra los módulos de control Esp32 y relé de activación desde la cual se controla cada uno de los actuadores en base a la señal enviada desde el sensor de pH de suelo.

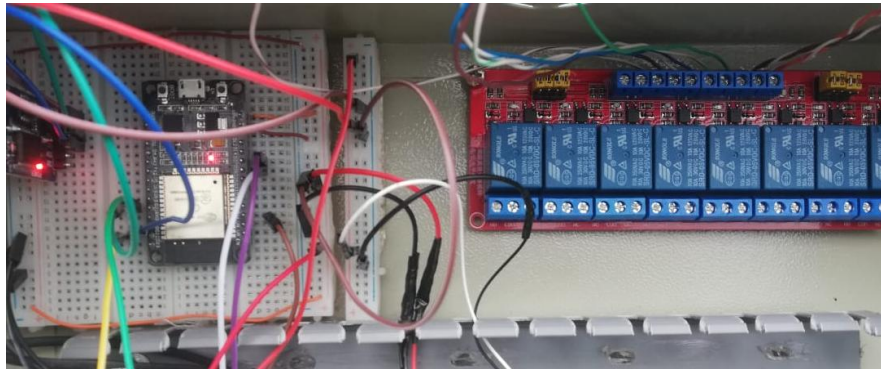


Fig. 27 Sistema de control ensamblado

4.15.7 Panel de potencia

En la parte de panel de potencia esta los elementos de protección del motor como son el guardamotor, un contactor y un disyuntor. La selección de los elementos se hizo en función al consumo eléctrico y la corriente nominal de funcionamiento del motor.

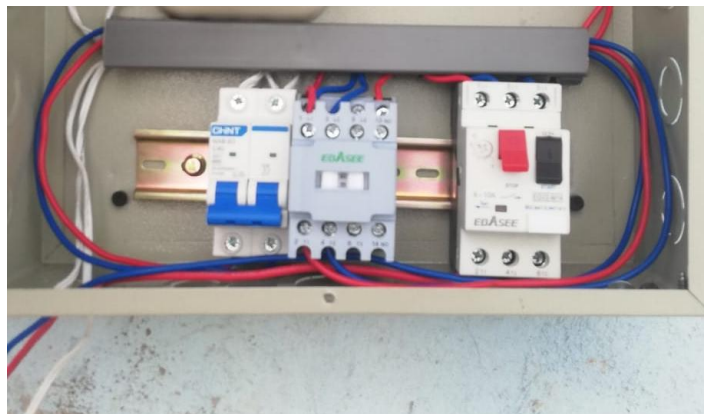


Fig. 28 Componentes del sistema de potencia

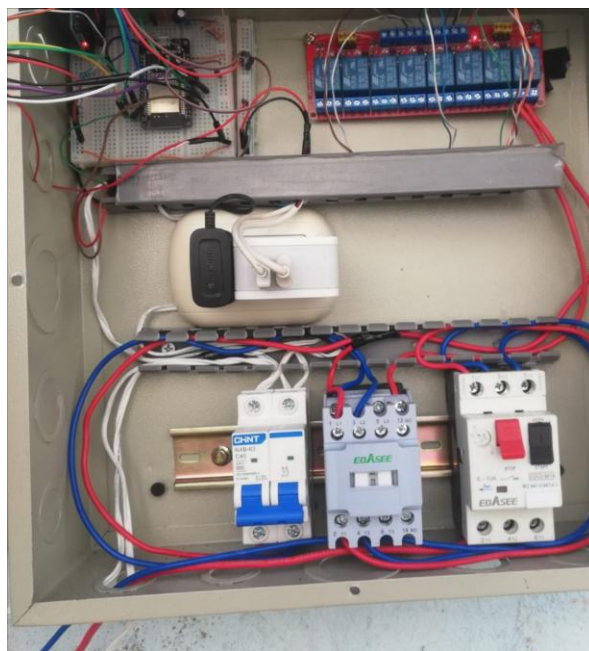


Fig. 29 Ensamblaje completo del gabinete

4.16 Pruebas de funcionamiento

Se realiza pruebas de funcionamiento para comprobar el correcto desempeño del sistema en condiciones reales de operación. Estas pruebas permiten verificar que el sistema responda de forma adecuada a las condiciones establecidas, asegurando que cumpla con los objetivos planteados en el diseño y con los requerimientos pedidos por el usuario.

4.16.1 Prueba del sensor de pH de suelo

Durante las pruebas del sensor de pH de suelo, se realiza la evaluación en tres situaciones distintas de dosificación de fertilizantes en el suelo: una con alta concentración de fertilizante, otra con baja concentración y una condición intermedia considerada como nivel normal. Esto permitió identificar cómo varía el pH en cada caso y definir el rango óptimo que favorece la disponibilidad de nutrientes, garantizando un correcto funcionamiento del sistema y el cumplimiento de los requerimientos agronómicos del cultivo de flores.



(a)

(b)

(c)

Fig. 31 Suelo con alta concentración de fertilizantes(a), Suelo moderado de fertilizantes (b), Suelo con baja concentración de fertilizantes (c)

```

COM26
-----
FFFFFFFFFFFFFFFFFFFFFFFF
Soil Ph: 25.5
13203D7995FFFFFFFF
Soil Ph: 6.1
13203D7995FFFFFFFF
Soil Ph: 6.1
13203D7995FFFFFFFF
Soil Ph: 6.1
13203D7995FFFFFFFF
Soil Ph: 6.1

```

Fig. 30 validación de datos enviados por el sensor

En la Fig. 30 se pueden observar los datos enviados por el sensor de pH del suelo en una condición de suelo con fertilización moderada, la cual representa el nivel ideal para el cultivo de flores.

4.16.2 Prueba modo manual

Al presionar el interruptor de encendido, el sistema inicia su funcionamiento de manera inmediata. El gabinete de control dispone de un selector que permite elegir entre el modo manual y automático. Cuando se encuentra en modo manual, el sistema registra y muestra en la pantalla los valores obtenidos por el sensor de pH del suelo, brindando al operador la posibilidad de decidir de forma manual si activa únicamente el riego, la aplicación de fertilizantes, o ambos de manera simultánea. En cada caso, la pantalla indica el estado actual de las funciones activadas o desactivadas, lo que facilita la supervisión en tiempo real. Esta funcionalidad fue implementada atendiendo los requerimientos de la petición del floricultor. Para desactivar el sistema se utilizan los mismos botones que fueron empleados para su activación.



Fig. 32 Operación en modo manual



Fig. 33 Interfaz modo manual

4.16.3 Prueba modo automatico

Cuando la perilla se encuentra posicionada en modo automático, el sensor comienza a enviar los datos de pH, los cuales se visualizan en tiempo real en la pantalla. Posteriormente, el programa analiza el nivel de pH detectado en el suelo para tomar decisiones de manera autónoma.

En el caso de que el nivel de pH supere el valor de 6.5, el sistema se activa de forma secuencial: primero se enciende la bomba de agua y, tras 1 minuto, se activan las electroválvulas encargadas de dosificar los fertilizantes. Este proceso se mantiene durante un periodo de 7 minutos para el motor y 5 minutos para las electroválvulas de los fertilizantes, tiempo estimado para que el pH retorne al rango adecuado.

Sin embargo, si el sensor detecta que el nivel de pH desciende por debajo de 5.5, el sistema se desactiva de inmediato, aunque no haya transcurrido el tiempo programado. En este caso, el orden de apagado es: primero se cierran las electroválvulas y, después de 1 minuto, se apaga la bomba de agua.

Todo el proceso de activación y desactivación, así como los valores de pH registrados, se pueden visualizar en la pantalla, lo que permite al usuario supervisar en tiempo real el funcionamiento del sistema de fertirrigación en modo automático.



Fig. 34 Operación modo automático

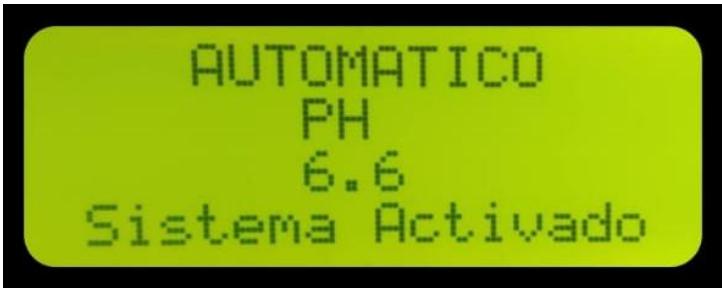


Fig. 35 Interfaz modo automático



Fig. 38 Estado de cultivo antes de la implementación del sistema



Fig. 39 Estado de cultivo después de la implementación del sistema

4.18 Costos

Se especifica el monto total del costo destinado a la Automatización del sistema de fertirrigación que se implementó en el invernadero de flores.

Tabla 19 Detalle de costos de los elementos de control

Material	Unidades	Precio (USD)	Total (USD)
Esp32	1	12,00	12,00
Pantalla LCD 16x4	1	5,00	5,00
Sensor Soil PH-S(RS485)	1	60,00	60,00
Electroválvulas 1/2	2	30,00	30,00
Motor eléctrico	1	55,00	55,00
Relay 4 canales	1	10,00	10,00
Total			172,00

Tabla 20 Detalles de costos de los materiales para la instalación eléctrica y de control

Material	Unidades	Precio (USD)	Total (USD)
Gabinete metálico 30x30	1	30,00	30,00
Pulsadores	4	0,75	3,00
Riel Din	1	1,00	1,00
Cable UTP	20	0,30	6,00
Canaleta ranurada	1	2,00	2,00
Cable macho-macho	1	0,10	2,50
Cable hembra-hembra	1	0,10	2,50

Contactador 10A	1	6,00	6,00
Guardamotor 10A	1	20,00	20,00
Interruptor	1	5,00	1,00
Disyuntor termomagnético	1	5,00	5,00
Perilla 2 posiciones	1	0,50	0,50
Modulo RS485	1	2,50	2,50
Fuente de 5 VC	2	5,00	10,00
Fuente de 12 VC	1	8,00	8,00
Cable flexible #10	20	0,50	10,00
Total			110,00

CONCLUSIONES

Se identificaron los parámetros necesarios para automatizar el sistema de fertirrigación, principalmente el nivel de pH del suelo que se emplea para el cultivo de las flores. Estos parámetros resultaron ser fundamentales para regular de manera precisa la cantidad de agua y fertilizantes a aplicar.

La automatización demostró ser efectiva para manejar la dosificación de fertilizantes y riego, lo que resultó una mejora significativa en la eficiencia del uso de los recursos.

El sistema respondió adecuadamente a los cambios de nivel de pH del suelo, regulando la aplicación de fertilizantes en función de las necesidades del terreno.

Con la automatización del sistema de fertirrigación, se logró optimizar el uso de los recursos en el cultivo, a la vez se redujo significativamente la carga operativa, lo que se evidenció un desempeño adecuado de su aplicación en el ámbito agrícola.

RECOMENDACIONES

Se recomienda seguir perfeccionando el sistema automatizado de fertirrigación, considerando su aplicación en diferentes tipos de cultivos y condiciones climáticas.

Se recomienda investigar la escalabilidad del sistema, tanto en términos de capacidad como de costos, para hacerlo más accesible a diferentes tamaños de invernaderos y usuarios en diversos contextos.

Es importante realizar mantenimiento preventivo de forma regular en los equipos eléctricos, electrónicos y sensores para evitar que el sistema se deteriore rápidamente por corrosión.

Aunque el sensor de pH y las electroválvulas han sido adecuados, se sugiere investigar la inclusión de otros sensores para hacer el sistema aún más preciso y adaptable.

REFERENCIAS

- [1] ICCI, «ICCI,» 1 Noviembre 1999. [En línea]. Available: <http://icci.nativeweb.org/boletin/nov99/guatemala.html>.
- [2] Redagricola, «Redagricola,» 30 junio 2021. [En línea]. Available: <https://www.redagricola.com/co/optimizando-el-riego-y-nutricion-en-cultivos-de-flores/>.
- [3] K. Sergieieva, «Tecnología Agrícola: Evolución, Retos Y Su Impacto,» *EOS DATA ANALYTICS*, 14 Junio 2023.
- [4] Franni, «Liveplant,» 9 agosto 2024. [En línea]. Available: <https://liveplantbiotech.com/blog/agricultura-de-invernadero/>.
- [5] Butterc, «El papel de la tecnología en la agricultura moderna,» 20 agosto 2024.
- [6] Union tecnologica, «Innovaciones en el Riego, Eficiencia y Sostenibilidad.,» julio 2024.
- [7] Argus Control Systems, «Fertigation & irrigation,» s.f.
- [8] F. & B. S. M. Rodríguez Díaz, Control y robótica en agricultura, Madrid: Ediciones Mundi-Prensa, 2013.
- [9] I. I. d. C. p. l. A. IICA, Manual práctico de fertirrigación, San Jose: Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura (IICA), 2022.
- [10] Cherlinka, «Fertirrigación Para Optimizar Los Procesos De Cultivo.,» 2021.
- [11] Coelho,A, «Riego por goteo, ahorro y sostenibilidad explicados,» 2024.
- [12] Intagri.com, [En línea]. Available: <https://www.intagri.com/articulos/agua-riego/sistema-de-riego-por-goteo>.
- [13] E. S. y. M. O.-H. Tatiana Sanchez-Jones, « University of Florida IFAS Extension,» enero 2025. [En línea]. Available: <https://edis.ifas.ufl.edu/publication/HS1192>.
- [14] FAO, «El Cultivo Protegido en Clima Mediterráneo,» 92-5-302719-3 ed., Roma, FAO - Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación, 2002.
- [15] S. Living, «This Is When You Should Fertilize Roses For The Best Blooms,» 4 Marzo 2025.
- [16] l. e. p. d. r. central riego, 4 enero 2021. [En línea]. Available: https://centralriego.cl/wp-content/uploads/2020/05/EMISORES_CENTRAL_RIEGO.pdf.

- [17] Fesmex, «Pérdidas por Fricción en Tuberías,» *Fesmex Mexicali*, 22 enero 2020.
- [18] T. E. ToolBox, «PE (PolyEthylene) Pipes,» 2006. [En línea]. Available: https://www.engineeringtoolbox.com/pe-pipe-pressure-loss-d_619.html.
- [19] A. J, «PASIÓN ELECTRÓNICA,» 12 Febrero 2022. [En línea]. Available: <https://pasionelectronica.com/esp32-caracteristicas-y-pines/>.
- [20] Naylamp Mechatronics, «Válvula solenoide 1/2" 12VDC (NC),» 8 julio 2021. [En línea]. Available: <https://naylampmechatronics.com/valvulas/314-valvula-solenoide-1p2-pulg-12vdc-nc.html>.
- [21] Didácticas Electrónicas I+D, «Didácticas Electrónicas I+D,» 2025 julio 3. [En línea]. Available: <https://www.didacticaselectronicas.com/shop/rs-ph-no1-tr-1-rs485-5-30v-sensor-de-ph-del-suelo-24088>.
- [22] C. Tecnologia, « Circuitos y Desarrollo en Tecnología,» 7 agosto `2021. [En línea]. Available: <https://sps.cdtecnologia.net/pantallas/4236-3925-pantalla-lcd-16x4-con-i2c.html>.
- [23] C. I. SAC, «CORONEL IMPORT SAC,» BOMBA DE AGUA PERIFÉRICA LEO APM75, 3 JULIO 2025. [En línea]. Available: <https://coronelimportsac.com.pe/product/apm-bomba-periferica/>.
- [24] E. Nahum, *Automatización de la producción agrícola bajo invernadero: una revisión*, 2017.
- [25] T. Muñoz, «Automatizacion del Sistema de riego por goteo para control de humedad del suelo en un invernadero de rosas,» 12 Octubre 2021. [En línea]. Available: <file:///C:/Users/Usuario/Desktop/7mo%20NIVEL/Titulacion1/TESIS%20DE%20GRADO.pdf>.
- [26] Martorell, «PRISMAB,» 22 Mayo 2022. [En línea]. Available: <https://prismab.com/blog/en-que-consiste-un-sistema-de-riego-por-goteo-automatizado/>.
- [27] J. J. Elizondo, «Estudio de la automatización del riego por goteo en el cultivo de,» 2022. [En línea]. Available: <http://dspace.utb.edu.ec/bitstream/handle/49000/13203/E-UTB-FACIAG-ING%20AGROP-000239.pdf?sequence=1&isAllowed=y>.
- [28] Verdes Horizontes, «Riego Inteligente: Sistemas Automatizados que Responden a Sensores de Humedad del Suelo,» 5 enero 2024.
- [29] 123RF, [En línea]. Available: https://es.123rf.com/photo_72984593_sistema-de-riego-por-goteo-ilustraci%C3%B3n-vectorial.html.

- [30] KONIBA, [En línea]. Available: <https://jardineriakoniba.com/content/10-sistemas-de-riego>.
- [31] A. Valdivielso, «¿Cómo funciona el riego por aspersión?,» 2020.
- [32] Agropinos, 24 Marzo 2022. [En línea]. Available: <https://www.agropinos.com/blog/sistema-de-riego-por-aspersion>.
- [33] ELECTROVÁLVULA SOLENOIDE 3/4" 12VDC 1A, 3 julio 2025. [En línea]. Available: <https://electronicasigma.com.gt/producto/electro-valvula-solenoides-3-4-12vdc-1a-normalmente-cerrada/>.
- [34] H. Bolivia, «Medición pH en suelos y la importancia sus nutrientes,» Hanna Bolivia, [En línea]. Available: Medición pH en suelos y la importancia sus nutrientes.
- [35] An Jarl Enterprise Co., Ltd, «An Jarl Enterprise Co., Ltd,» Emisor de goteo de inserción rápida BJ-571, [En línea]. Available: <https://www.anja.com.tw/es/product-536013/El-emisor-de-goteo-de-inserci%C3%B3n-r%C3%A1pida-gotero-se-puede-utilizar-para-diferentes-tuber%C3%ADas-para-regar-tuber%C3%ADa-de-PE-manguera-plana-de-PE-tuber%C3%ADa-de-PVC-gotero-BJ-571.html>.

ANEXOS

ANEXO A: DATOS TECNICOS DEL MOTOR



www.leopump.com

APm37		No. A24080425	
Q 5-35 l/min		H 35-5 m	IP X4
Hmax 40 m		Hmin 5 m	I CL F
1 ~Mot	110-120 V~	60 Hz	3400 min ⁻¹
Pout 0.37 kW		Pout 0.5 HP	In 5 A
Size 1" x 1"		C 20 μ F	VL 250 V
Continuous duty	Thermally protected	Twater max. 60°C	

ANEXO B: CODIGO DE PROGRAMACION

```
// Incluimos librerías necesarias

#include <Wire.h>           // Comunicación I2C

#include <hd44780.h>       // Controlador HD44780 de la LCD

#include <hd44780ioClass/hd44780_I2Cexp.h> // Clase para usar la LCD por I2C

#include <RTCLib.h>       // Librería para manejar el RTC DS3231

// Definición de pines

#define MOTOR_PIN 23 // Pin salida para bomba de agua

#define SENSOR_H 34 // Pin para sensor de humedad (no lo usamos ahora)

#define SENSOR_PH 35 // Pin para sensor de pH

// Selectores

#define SEL_IZQ 27 // Selector a la izquierda: modo manual

#define SEL_DER 26 // Selector a la derecha: modo automatico

// Botones

#define BTN_ON 32 // Botón para encender bomba en modo manual

#define BTN_OFF 33 // Botón para apagar bomba en modo manual

#define BTN_VALV_A 25 // Botón para activar/desactivar válvula A

#define BTN_VALV_B 14 // Botón para activar/desactivar válvula B

// Válvulas

#define VALV_A_PIN 12 // Pin salida para electroválvula A

#define VALV_B_PIN 13 // Pin salida para electroválvula B

// Objetos para LCD y RTC

hd44780_I2Cexp lcd(0x27); // LCD con dirección I2C 0x27

RTC_DS3231 rtc; // Objeto para el reloj DS3231

// Variables de estado

bool motorEncendido = false; // Guarda si la bomba está encendida

bool valvAEncendida = false; // Guarda si la válvula A está encendida

bool valvBEncendida = false; // Guarda si la válvula B está encendida

bool modoManual = false; // Indica si estamos en modo manual

bool modoAutomatico = false; // Indica si estamos en modo automático
```

```

bool modoTiempo = false;    // Indica si estamos en modo automatico

// Variables para detectar cambios de estado en botones
bool btnOnLastState = HIGH;
bool btnOffLastState = HIGH;
bool btnValvALastState = HIGH;
bool btnValvBLastState = HIGH;

unsigned long lastBtnTime = 0; // Para control de antirrebote en botones

// Control de secuencia automática (con estados)
enum AutoEstado { AUTO_IDLE, AUTO_BOMBA_ENCENDIDA, AUTO_VALVULAS_ENCENDIDAS };
AutoEstado estadoAuto = AUTO_IDLE; // Estado actual de la secuencia automática
unsigned long autoStartTime = 0; // Guarda el tiempo de inicio de la secuencia

// Umbrales de pH
float phMin = 5.5;          // pH mínimo: si baja de esto, se apaga todo
float phMax = 6.5;          // pH máximo (no se usa directamente aquí)

void setup() {
    // Configuramos los pines como salidas o entradas
    pinMode(MOTOR_PIN, OUTPUT);
    pinMode(VALV_A_PIN, OUTPUT);
    pinMode(VALV_B_PIN, OUTPUT);

    pinMode(SEL_IZQ, INPUT_PULLUP); // Selector con resistencia pull-up
    pinMode(SEL_DER, INPUT_PULLUP);
    pinMode(BTN_ON, INPUT_PULLUP);
    pinMode(BTN_OFF, INPUT_PULLUP);
    pinMode(BTN_VALV_A, INPUT_PULLUP);
    pinMode(BTN_VALV_B, INPUT_PULLUP);

    lcd.begin(16, 4);           // Inicializa LCD de 16 columnas y 4 filas
    lcd.clear();               // Limpia la pantalla

```

```

Serial.begin(115200);      // Inicializa puerto serie para depuración

if (Irtc.begin()) {      // Comprueba si el RTC está conectado
  lcd.print("RTC no detectado");

  while (1);            // Si falla, se queda aquí detenido
}

if (rtc.lostPower()) {   // Si el RTC perdió alimentación
  rtc.adjust(DateTime(F(__DATE__), F(__TIME__))); // Ajusta fecha/hora actual
}
}

// Función para leer pH promediando 10 lecturas
float leerPHFiltrado() {
  int total = 0;
  for (int i = 0; i < 10; i++) {
    total += analogRead(SENSOR_PH); // Lee valor analógico del sensor
    delay(10);                       // Espera pequeña para estabilizar
  }
  float voltaje = (total / 10.0) * 3.3 / 4095.0; // Convierte a voltaje (0–3.3V)
  float ph = 14.0 - (voltaje * 5.0);           // Calcula pH aproximado (ajustar calibración real)
  return ph;
}

// Función para actualizar el modo según el selector
void actualizarModo() {
  bool izq = digitalRead(SEL_IZQ); // Lee si está presionado el selector izquierdo
  bool der = digitalRead(SEL_DER); // Lee si está presionado el selector derecho
  bool cambio = false;           // Bandera para saber si cambiamos de modo

  if (!izq && der) {             // Selector a izquierda → modo manual
    if (!modoManual) cambio = true;
    modoManual = true; modoAutomatico = false; modoTiempo = false;
  } else if (izq && !der) {      // Selector a derecha → modo automatico
    if (!modoTiempo) cambio = true;
    modoManual = false; modoAutomatico = false;
  }
}

```

```

} else {          // Si ninguno está presionado → modo automático

  if (!modoAutomatico) cambio = true;

  modoManual = false; modoAutomatico = true;

}

if (cambio) {    // Si hubo cambio de modo

  lcd.clear();   // Limpia la pantalla

  motorEncendido = false; valvAEncendida = false; valvBEncendida = false;

  digitalWrite(MOTOR_PIN, LOW); // Apaga todo por seguridad

  digitalWrite(VALV_A_PIN, LOW);

  digitalWrite(VALV_B_PIN, LOW);

  estadoAuto = AUTO_IDLE;      // Reinicia secuencia automática

  lcd.setCursor(0, 0);        // Muestra en pantalla el nuevo modo

  if (modoManual) lcd.print(" MODO: MANUAL ");

  if (modoAutomatico) lcd.print(" MODO: AUTO ");

}

}

void loop() {

  actualizarModo();          // Siempre revisa si cambiamos de modo

  unsigned long ahora = millis(); // Guarda el tiempo actual

  if (modoManual) {

    // Leemos botones

    bool onRead = digitalRead(BTN_ON);

    bool offRead = digitalRead(BTN_OFF);

    bool valvARead = digitalRead(BTN_VALV_A);

    bool valvBRead = digitalRead(BTN_VALV_B);

    // Si presionamos botón ON y antes estaba en HIGH (para detectar el pulso)

    if (onRead == LOW && btnOnLastState == HIGH && (ahora - lastBtnTime > 200)) {

      motorEncendido = true; lastBtnTime = ahora;

    }

    if (offRead == LOW && btnOffLastState == HIGH && (ahora - lastBtnTime > 200)) {

```

```

    motorEncendido = false; lastBtnTime = ahora;
}
if (valvARead == LOW && btnValvALastState == HIGH && (ahora - lastBtnTime > 200)) {
    valvAEncendida = !valvAEncendida; lastBtnTime = ahora;
}
if (valvBRead == LOW && btnValvBLastState == HIGH && (ahora - lastBtnTime > 200)) {
    valvBEncendida = !valvBEncendida; lastBtnTime = ahora;
}

// Guardamos el estado actual para la próxima vez
btnOnLastState = onRead; btnOffLastState = offRead;
btnValvALastState = valvARead; btnValvBLastState = valvBRead;

// Activamos salidas físicas según el estado
digitalWrite(MOTOR_PIN, motorEncendido ? HIGH : LOW);
digitalWrite(VALV_A_PIN, valvAEncendida ? HIGH : LOW);
digitalWrite(VALV_B_PIN, valvBEncendida ? HIGH : LOW);

// Mostrar en LCD
lcd.setCursor(0, 0); lcd.print(" MODO: MANUAL ");
lcd.setCursor(0, 1); lcd.print("Riego: "); lcd.print(motorEncendido ? "ON " : "OFF ");
lcd.setCursor(0, 2); lcd.print("Fert. A: "); lcd.print(valvAEncendida ? "ON " : "OFF");
lcd.setCursor(0, 3); lcd.print("Fert. B: "); lcd.print(valvBEncendida ? "ON " : "OFF");

// Leer pH y mostrarlo en esquina (línea 1, columna 12)
float ph = leerPHFiltrado();
lcd.setCursor(12, 1);
lcd.print("pH:");
lcd.print(ph,1);
}

else if (modoAutomatico) {
    float ph = leerPHFiltrado(); // Leer pH actual

    lcd.setCursor(0, 0); lcd.print(" MODO: AUTO ");

```

```

lcd.setCursor(0, 1); lcd.print("pH: "); lcd.print(ph,1); lcd.print("  ");

if (ph < phMin) {

  // Si pH < 5.5 → apagamos todo

  motorEncendido = false; valvAEncendida = false; valvBEncendida = false;

  estadoAuto = AUTO_IDLE;

  lcd.setCursor(0,2); lcd.print("pH < 5.5 STOP! ");

} else if (ph > 6.5) {

  // Si pH > 6.5 → iniciamos o continuamos secuencia automática

  if (estadoAuto == AUTO_IDLE) {

    autoStartTime = ahora;    // Guardamos momento de inicio

    motorEncendido = true;    // Encendemos bomba

    estadoAuto = AUTO_BOMBA_ENCENDIDA;

  }

  unsigned long elapsed = (ahora - autoStartTime)/1000; // Tiempo transcurrido en segundos

  if (estadoAuto == AUTO_BOMBA_ENCENDIDA && elapsed >= 60) {

    // Después de 1 minuto → encendemos válvulas

    valvAEncendida = true; valvBEncendida = true;

    estadoAuto = AUTO_VALVULAS_ENCENDIDAS;

  }

  if (estadoAuto == AUTO_VALVULAS_ENCENDIDAS) {

    if (elapsed >= 300) { // Después de 5 min → apagamos válvulas

      valvAEncendida = false; valvBEncendida = false;

    }

    if (elapsed >= 360) { // Después de 6 min → apagamos bomba

      motorEncendido = false;

    }

    if (elapsed >= 420) { // Después de 7 min → reiniciamos secuencia

      estadoAuto = AUTO_IDLE;

    }

  }

}

```

```

    lcd.setCursor(0,2);
    lcd.print("Sistema: ACTIVO ");
} else {
    // Si pH entre 5.5 y 6.5 → no hace nada
    motorEncendido = false; valvAEncendida = false; valvBEncendida = false;
    estadoAuto = AUTO_IDLE;
    lcd.setCursor(0,2); lcd.print("Esperando... ");
}

// Mostrar resumen de estado en línea 3
lcd.setCursor(0,3);
lcd.print("R:"); lcd.print(motorEncendido?"ON ":"OFF");
lcd.print(" A:"); lcd.print(valvAEncendida?"ON ":"OFF");
lcd.print(" B:"); lcd.print(valvBEncendida?"ON ":"OFF");
}

// Activamos o apagamos las salidas físicas finales
digitalWrite(MOTOR_PIN, motorEncendido ? HIGH : LOW);
digitalWrite(VALV_A_PIN, valvAEncendida ? HIGH : LOW);
digitalWrite(VALV_B_PIN, valvBEncendida ? HIGH : LOW);
}

```

ANEXO C: MANUAL DE USUARIO

Sistema de Fertirrigación Automatizado para Invernadero de Flores

Introducción

El objetivo de este manual describe el funcionamiento, uso y precauciones del sistema de fertirrigación automatizado instalado en el invernadero con el fin de proporcionar al operario las instrucciones necesarias para utilizar y supervisar correctamente el sistema.

Descripción del Sistema

El sistema está compuesto por un gabinete en donde en la parte interna está compuesta por un sistema de potencia y de control. Asimismo en la parte frontal del gabinete se encuentran los botones para el manejo del sistema

gabinete parte frontal



Tabla 1

Elementos de la parte frontal del gabinete

N.º	Elemento	Función
1	Pantalla LCD	Mostrar mensaje de estado
2	Interruptor	Encender/apagar el sistema
3	Selector	Seleccionar el modo de operación
4	Botones de riego	Activar y desactivar el estado de la bomba
5	Botones de fertilizantes	Activar y desactivar las electroválvulas

Gabinete parte interna:

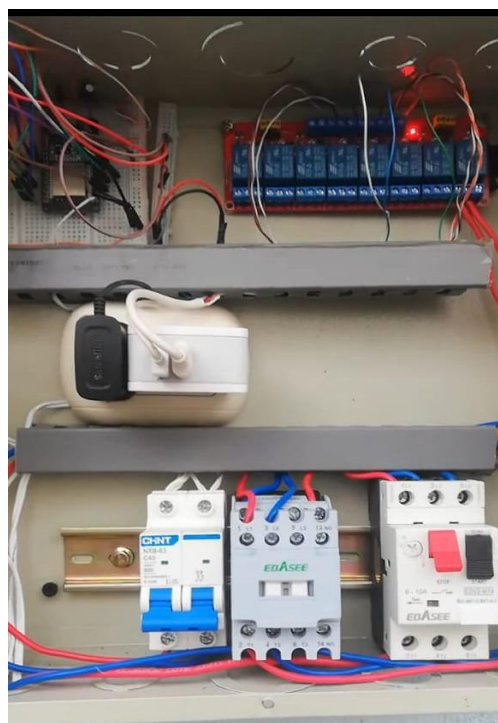


Tabla 2

Elementos de la parte interna del gabinete

Sistema	Elementos
Control	<ul style="list-style-type: none">• ESP32• Relé
Potencia	<ul style="list-style-type: none">• Disyuntor• Guardamotor• Fuente de alimentación• Contactor

Modos de Operación

Modo Manual

El estado de la perilla determinará el modo de funcionamiento del sistema en la cual se imprimirá en la pantalla LCD

1. Activa colocando el selector en posición hacia arriba
2. El encendido/apagado de la bomba se realiza mediante los botones físicos:
3. Botón azul: Encender.
4. Botón rojo: Apagar.
5. Las válvulas se controlan manualmente desde el tablero.

Pantalla LCD modo manual



N.º	Función
1	Mostrar el modo del sistema
2	Mensaje de estado de los actuadores
3	pH actual del suelo

Modo automático

1. Activa colocando el selector en posición hacia abajo.
2. El sistema se activa automáticamente dependiendo del nivel de PH del suelo

Secuencia:

1. Activa bomba de agua
2. Después de 1 minuto de activación de la bomba de agua activa válvulas de los fertilizantes A Y B.
3. El riego lo hace durante 5 minutos.
4. Desactiva válvulas de fertilizantes después de 5 minutos de activación.

5. Desactiva bomba de agua 1 minuto después de la desactivación de las válvulas de fertilizantes.
6. Si el sensor de pH indica valores fuera del rango óptimo, se desactiva todo el sistema.

Pantalla LCD modo automático



N.º	Función
1	Mostrar el modo del sistema
2	pH actual del suelo
3	Mostrar mensaje de la función del sistema

Recomendaciones de Uso

1. Verificar que las válvulas y bomba estén conectadas correctamente antes de encender.
2. No cambiar de modo con el sistema en operación; hacerlo solo cuando esté en reposo.
3. Limpiar periódicamente el sensor para evitar lecturas erróneas.
4. Revisar que el suministro de agua y fertilizante sea suficiente antes de iniciar el riego.

Solución de problemas

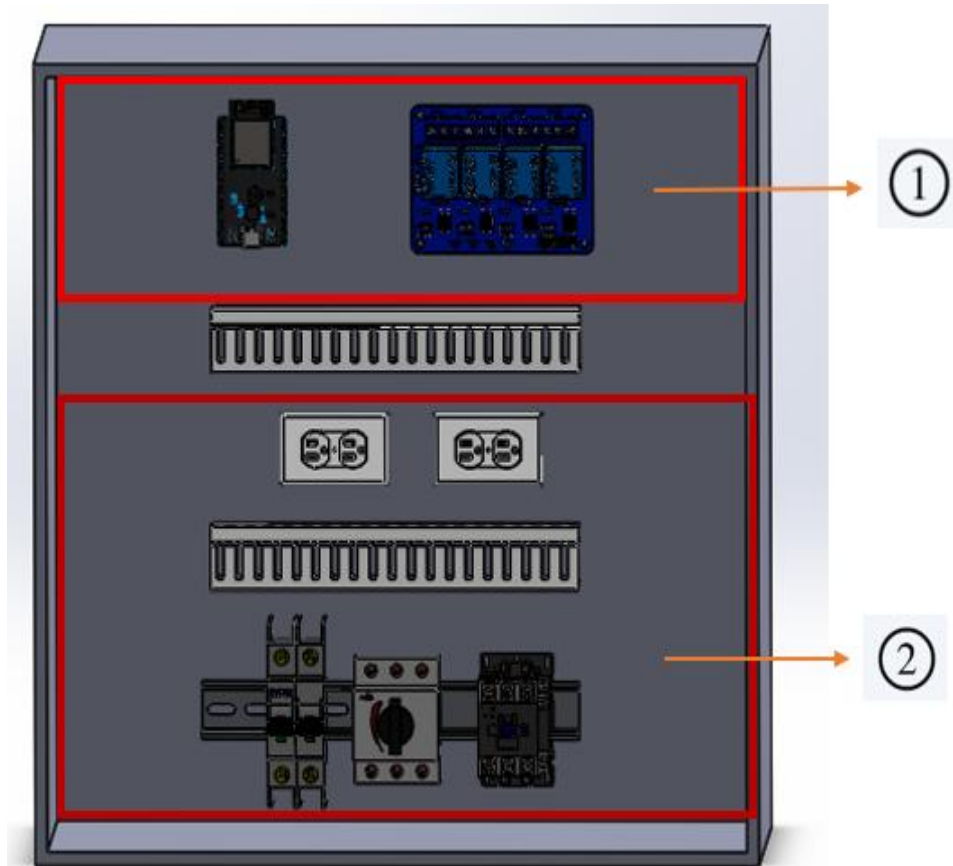
Tabla 3

Problema	Posible causa	Solución
El sistema no enciende	No hay energía eléctrica	Revisar la conexión de la fuente de alimentación
No riega en el modo automático	Sensor de PH defectuoso	Revisar conexiones o reemplazar
No dosifica los fertilizantes	Las válvulas atascadas	Revisar válvula, realizar limpieza
Pantalla sin mostrar datos	Cable desconectado	Reconectar cables, reiniciar
Bomba de agua no enciende	Cable desconectado	Revisar elementos de protección en el gabinete de control Revisar las conexiones de los cables

Mantenimiento

1. **Sensor:** Limpiar con agua destilada cada mes.
2. **Válvulas:** Revisar cada 3 meses para evitar obstrucciones.
3. **Bomba:** Lubricar según especificaciones del fabricante.
4. **Sistema eléctrico:** Inspección visual mensual.

ANEXO D: DISEÑO DEL GABINETE



Numero	Sistema
1	Control
2	Potencia