



UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI
FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERÍA Y APLICADAS
CARRERA DE ELECTROMÉCANICA

TÍTULO DEL PROYECTO DE TITULACIÓN

**DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE INYECCIÓN PARA
FERTIRRIGACIÓN EN CULTIVO DE ROSAS**

PROPUESTA TECNOLÓGICA, PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE
INGENIERO ELECTROMÉCANICO

AUTOR :

Bryan Alexander Farinango Landeta

TUTOR:

Ing. Luigi Orlando Freire Martínez

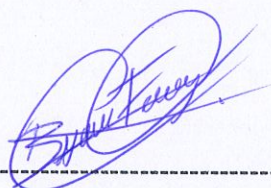
LATACUNGA, AGOSTO - 2026

Latacunga, agosto del 2026

DECLARATORIA DE AUTORIA

YO Farinango Landeta Bryan Alexander declaro ser el autor del proyecto de titulación” **DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE INYECCIÓN PARA FERTIRRIGACIÓN EN CULTIVO DE ROSAS**”, siendo el **Ing. Luigi Orlando Freire Martínez** tutor del presente trabajo de titulación; y eximo expresamente a la Universidad Técnica de Cotopaxi y a sus representantes legales de posibles reclamos o acciones legales.

Además, certifico que las ideas, conceptos, procedimientos y resultados vertidos en el presente trabajo de titulación, son de mi exclusiva responsabilidad.

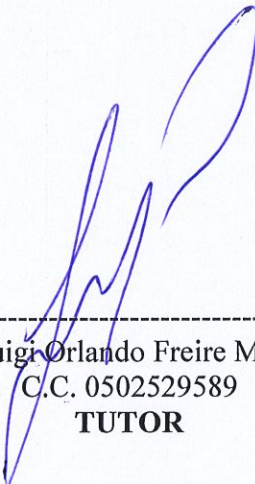


Bryan Alexander Farinango Landeta
CC. 1723977003
AUTOR

Latacunga, agosto de 2026

AVAL DEL TUTOR DEL PROYECTO DE TITULACIÓN

En calidad de Tutor de la Propuesta Tecnológica sobre el título: **“DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE INYECCIÓN PARA FERTIRRIGACIÓN EN CULTIVO DE ROSAS”**, propuesto por los estudiantes **Farinango Landeta Bryan Alexander** de la Carrera de Electromecánica considero que dicho proyecto de titulación cumple con los requerimientos metodológicos y aportes científico-técnicos suficientes para ser sometidos al tribunal de lectores.



Ing. Luigi Orlando Freire Martínez
C.C. 0502529589
TUTOR



AVAL DE APROBACIÓN DEL TRIBUNAL DE TITULACIÓN

En calidad de Tribunal de Lectores, aprueban el presente informe de titulación de acuerdo a las disposiciones reglamentarias emitidas por la Universidad Técnica de Cotopaxi, y por la Facultad de Ciencias de la Ingeniería y Aplicadas; por cuanto, el postulante: Farinango Landeta Bryan Alexander, con el título del Proyecto de Titulación: **“DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE INYECCIÓN PARA FERTIRRIGACIÓN EN CULTIVO DE ROSAS”**, ha considerado las recomendaciones emitidas oportunamente y reúne los méritos suficientes para ser sometido al acto de sustentación del trabajo de titulación.

Por lo antes expuesto, se autoriza grabar los archivos correspondientes en un CD, según la normativa institucional.

Latacunga, 7 de agosto de 2026

Para constancia firman:

Jefferson Alberto Porras Reyes
C.C: 0704400449
LECTOR 1 (PRESIDENTE)

Mauro Dario Albarracín Alvarez
C.C: 0503113730
LECTOR 2 (MIEMBRO)

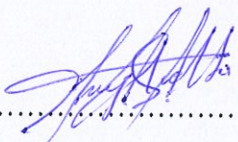
Gonzalo Xavier Vizuite Fiallos
C.C: 1714631361
LECTOR 3 (MIEMBRO)

Latacunga, agosto de 2026

AVAL DE IMPLEMENTACIÓN

Mediante presente pongo a consideración que, el señor: **Farinango Landeta Bryan Alexander** con **C.I. 1723977003**, realizan la entrega del Prototipo de Titulación con el Título “**DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE INYECCIÓN PARA FERTIRRIGACIÓN EN CULTIVO DE ROSAS**” el mismo que cuenta con un sistema automatizado de inyección para fertirrigación, integrado por un sistema de control local para el monitoreo y regulación de variable de conductividad eléctrica (CE), caudal y presión. El módulo implementado funciona correctamente de acuerdo con los parámetros establecidos, por lo que mediante la presente valida su funcionamiento.

Atentamente:



.....

Sra. Jessy Margarita Landeta Conlago

Dueña

C.I.: 1717638322

AGRADECIMIENTO

*Expreso mi más sincero agradecimiento
a la Universidad Técnica de Cotopaxi,
Matriz, por haberme brindado la
oportunidad de formarme
profesionalmente y adquirir los
conocimientos, experiencias y valores
necesarios para afrontar los retos de mi
vida profesional.*

*De manera especial, agradezco a mi
tutor, Ing. Luigi Orlando Freire
Martínez, por su orientación, disposición
y conocimientos compartidos durante el
desarrollo de este trabajo de titulación.
Su acompañamiento y observaciones
fueron fundamentales para culminar
satisfactoriamente este proyecto.*

*Asimismo, agradezco a los docentes de la
Universidad Técnica de Cotopaxi que
formaron parte de mi preparación
académica, por compartir sus
conocimientos y experiencias a lo largo
de mi formación.*

*Finalmente, agradezco a mi familia por
el respaldo, la confianza y la motivación
que me brindaron durante esta etapa. A
todas las personas que, de una u otra
manera, contribuyeron para alcanzar
esta meta, expreso mi más profunda
gratitud.*

DEDICATORIA

Dedico este trabajo, en primer lugar, a mi madre, Jessy Landeta, por ser un pilar fundamental en mi vida, por su amor, esfuerzo y apoyo incondicional durante cada etapa de mi formación académica.

Su confianza y motivación han sido esenciales para seguir adelante y alcanzar esta importante meta.

A, José Guacan pareja de mi madre, por su apoyo, sus consejos y por acompañarme a lo largo de este camino, brindándome el respaldo necesario para superar cada dificultad y continuar trabajando por mis objetivos.

A ellos, quienes han estado presentes durante este proceso y han contribuido de distintas maneras a mi crecimiento personal y profesional, dedico con gratitud este logro, que representa el resultado de años de esfuerzo, constancia y dedicación.

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI
FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERÍA Y APLICADAS

TITULO: “DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE INYECCIÓN PARA FERTIRRIGACIÓN EN CULTIVO DE ROSAS”

Autor:

Bryan Alexander Farinango Landeta

RESUMEN

El presente proyecto tuvo como objetivo diseñar e implementar un sistema automatizado de inyección para fertirrigación en cultivo de rosas. La propuesta se desarrolló a partir de la caracterización del proceso manual existente y de la identificación de variables de interés como pH, conductividad eléctrica (CE), caudal y presión. Se diseñó una arquitectura hidráulica con dos etapas de bombeo y se integraron sensores industriales, un M5Stack Tough como unidad de procesamiento y supervisión, comunicación RS485-Modbus RTU y un variador de frecuencia para regular la bomba secundaria de 0,51 kW (0,7 HP) mediante una estrategia de control PI. La validación incluyó pruebas de comunicación, adquisición de variables, presión, caudal, interfaz de supervisión y respuesta del controlador. Durante aproximadamente 39 minutos de monitoreo se obtuvieron 2333 registros consecutivos sin pérdidas de comunicación reportadas. Los resultados confirmaron la integración funcional de los dispositivos, la adquisición continua de las variables del proceso y una respuesta estable de la lógica de control y del variador de frecuencia. En conjunto, las pruebas realizadas permitieron validar el funcionamiento del sistema automatizado implementado como una plataforma de monitoreo RS485, supervisión y control para el proceso de fertirrigación, aplicable a pequeñas unidades productivas florícolas.

Palabras clave: fertirrigación, automatización, conductividad eléctrica, sistema de inyección, control PI.

TECHNICAL UNIVERSITY OF COTOPAXI
FACULTY OF ENGINEERING AND APPLIED SCIENCES

THEME: “DESIGN AND IMPLEMENTATION OF AN INJECTION SYSTEM FOR FERTIGATION IN ROSE CULTIVATION.”

Authors:

Bryan Alexander Farinango Landeta

ABSTRACT

This project aimed to design and implement an automated injection system for fertigation in rose cultivation. The proposal was developed based on the characterization of the existing manual process and the identification of key variables such as pH, electrical conductivity (EC), flow rate, and pressure. A hydraulic architecture with two pumping stages was designed, integrating industrial sensors, an M5Stack Tough as the processing and supervision unit, RS485-Modbus RTU communication, and a variable frequency drive to regulate the secondary pump rated at 0,51 kW (0,7 HP) through a PI control strategy. The validation included communication, variable acquisition, pressure, flow rate, supervision interface, and controller response tests. During approximately 39 minutes of monitoring, 2,333 consecutive records were obtained with no reported communication losses. The results confirmed the functional integration of the devices, continuous acquisition of process variables, and a stable response of the control logic and the variable frequency drive. Overall, the tests validated the operation of the implemented automated system as an RS485-based monitoring, supervision, and control platform for the fertigation process, suitable for small-scale flower production units.

Keywords: fertigation, automation, electrical conductivity, injection system, PI control.

Latacunga, agosto del 2026

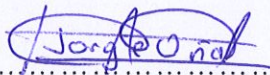
AVAL DE TRADUCCIÓN

En calidad de Docente del Idioma Inglés de la Unidad Educativa “Cacique Tumbala”; en forma legal **CERTIFICO** que:

La traducción del resumen al idioma Inglés del Proyecto de Titulación cuyo título versa: **“DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE INYECCIÓN PARA FERTIRRIGACIÓN EN CULTIVO DE ROSAS”** presentado por: **Farinango Landeta Bryan Alexander**, egresado de la Carrera de: **Electromecánica**, perteneciente a la **Facultad de Ciencias de la Ingeniería y Aplicadas (CIYA)**, lo realizó bajo mi supervisión y cumple con una correcta estructura gramatical del Idioma.

Es todo cuanto puedo certificar en honor a la verdad y autorizo al peticionario hacer uso del presente aval para los fines académicos legales.

Atentamente,



.....
Lic. Jorge Vinicio Oña Ninasunta

DOCENTE DE LA UNIDAD EDUCATIVA “CACIQUE TUMBALA”

CI: 0503101693

Quito, 16/08/2026

CERTIFICADO DE REGISTRO DE TÍTULO

El Ministerio de Educación, Deporte y Cultura, MINEDEC, certifica que OÑA NINASUNTA JORGE VINICIO, con documento de identificación número 0503101693, registra en el Sistema Nacional de Información de la Educación Superior del Ecuador (SNIESE), la siguiente información:

Nombre: OÑA NINASUNTA JORGE VINICIO
Número de documento de identificación: 0503101693
Nacionalidad: Ecuador
Género: MASCULINO

Título(s) de cuarto nivel o posgrado

Número de registro	1024-2024-2820677
Institución de origen	UNIVERSIDAD ESTATAL DE MILAGRO
Institución que reconoce	
Título	MAGISTER EN EDUCACION BASICA
Tipo	Nacional
Fecha de registro	2024-02-07
Área o Campo de Conocimiento	EDUCACION
Observaciones	

Título(s) de tercer nivel de grado

Número de registro	1020-09-908300
Institución de origen	UNIVERSIDAD TECNICA DE COTOPAXI
Institución que reconoce	
Título	LICENCIADO EN CIENCIAS DE LA EDUCACION ESPECIALIZACION INGLES
Tipo	Nacional
Fecha de registro	2009-04-13
Área o Campo de Conocimiento	EDUCACION
Observaciones	

OBSERVACIÓN:

- Los títulos de tercer nivel de grado ecuatorianos están habilitados para el ingreso a un posgrado.
- Los títulos registrados tanto nacionales como extranjeros han sido otorgados por instituciones de educación superior vigentes al momento de la emisión de la titulación.
- El cambio de nivel de formación de educación superior de los títulos técnicos y tecnológicos emitidos por instituciones de educación superior nacionales se ejecutó en cumplimiento a la Disposición Transitoria Octava de la Ley Orgánica Reformatoria a la LOES, expedida el 2 de agosto de 2018.

IMPORTANTE: La información proporcionada en este documento es la que consta en el SNIесе, que se alimenta de la información suministrada por las instituciones del sistema de educación superior, conforme lo disponen los artículos 126 y 129 de la Ley Orgánica de Educación Superior y 56 de su Reglamento.

El reconocimiento/registro del título no habilita al ejercicio de las profesiones reguladas por leyes específicas, y de manera especial al ejercicio de las profesiones que pongan en riesgo de modo directo la vida, salud y seguridad ciudadana conforme el artículo 104 de la Ley Orgánica de Educación Superior. Según la Resolución RPC-SO-16-No.256-

En caso de detectar inconsistencias en la información proporcionada de titulaciones nacionales, se recomienda solicitar a la institución de educación superior nacional que emitió el título, la rectificación correspondiente y, de ser una titulación extranjera, solicitar la rectificación al Ministerio de Educación, Deporte y Cultura.

Para comprobar la veracidad de la información proporcionada, usted debe acceder a la siguiente dirección:

www.educacionsuperior.gob.ec



Abg. Rubén Darío Ochoa Guaman

Director de Registro de Títulos

MINISTERIO DE EDUCACIÓN, DEPORTE Y CULTURA



0503101693

GENERADO: 16/08/2026 6.26 PM

Latacunga, agosto 2026

CERTIFICADO DE INFORME DE SIMILITUD

En calidad de Tutor del Proyecto de Titulación con el título: "DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE INYECCIÓN PARA FERTIRRIGACIÓN EN CULTIVO DE ROSAS", del postulante Farinango Landeta Bryan Alexander de la Carrera de Ingeniería Electromecánica remito la captura de pantalla del reporte del sistema de reconocimiento de texto Turnitin, con un porcentaje de coincidencia del 8%; y, expreso una vez más, mi conformidad en cuanto a la dirección del trabajo de titulación.

 Página 2 de 131 - Descripción general de integridad Identificador de la entrega: trnoid-13623163405

8% Similitud general

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

Filtrado desde el informe

- Bibliografía
- Texto citado
- Texto mencionado
- Coincidencias menores (menos de 8 palabras)

Fuentes principales

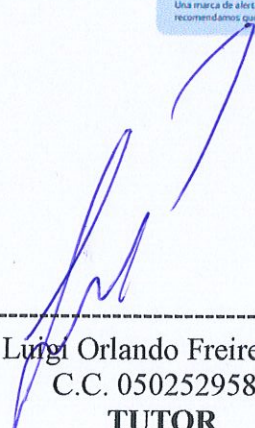
6%  Fuentes de Internet
1%  Publicaciones
3%  Trabajos entregados (trabajos del estudiante)

Marcas de integridad

N.º de alertas de integridad para revisión
No se han detectado manipulaciones de texto sospechosas.

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

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



Ing. Luigi Orlando Freire Martínez
C.C. 0502529589
TUTOR

ÍNDICE GENERAL

1. INFORMACIÓN GENERAL	3
2. INTRODUCCIÓN	3
2.1. SITUACIÓN PROBLEMÁTICA.....	4
2.2. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA	5
2.3. OBJETO Y CAMPO DE ACCIÓN.....	5
2.3.1. Objetivo de investigación	5
2.3.2. Campo de acción.....	6
2.4. BENEFICIARIOS.....	6
2.4.1. Directo.....	6
2.4.2. Indirecto	6
2.5. JUSTIFICACIÓN	6
2.6. OBJETIVOS.....	7
2.6.1. General	7
2.6.2. Específicos	7
2.6.3. Sistema de tareas	8
3. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA.....	11
3.1. ANTECEDENTES	11
3.1.1. Sistema automatizado de fertirrigación	11
3.1.2. Antecedentes del control de pH y CE en rosas	12
3.2. FUNDAMENTOS DE LA FERTIRRIGACIÓN	12
3.2.1. Fertirrigación en el cultivo de rosas.....	13
3.3. VARIABLES DE CONTROL EN FERTIRRIGACIÓN	13
3.3.1. Potencial de hidrogeno (pH)	13
3.3.2. Conductividad eléctrica (CE)	13
3.4. INSTRUMENTASION DEL SISTEMA.....	13

3.4.1.	Sensores de pH y conductividad eléctrica (CE) con comunicación RS485 .	14
3.4.2.	Sensor de presión	16
3.4.3.	Medición de caudal	17
3.5.	ELEMENTOS HIDRAULICOS DEL SISTEMA	17
3.5.1.	Sistema de bombeo y regulación	17
3.6.	AUTOMATIZACIÓN Y COMUNICACIÓN INDUSTRIAL	18
3.6.1.	Comunicación RS485 y Modbus RTU	18
3.7.	SISTEMAS DE FERTIRRIGACIÓN SEGÚN SU NIVEL DE AUTOMATIZACIÓN.....	19
3.7.1.	Sistema tradicional de fertirrigación	19
3.7.2.	Sistema automatizado de fertirrigación	20
3.8.	COMPONENTES DE CONTROL Y SUPERVISIÓN	21
3.8.1.	Variador de frecuencia.....	21
3.8.2.	M5 Stack tough	22
3.9.	SISTEMA AUTOMATIZADO DE INYECCIÓN.....	22
3.9.1.	Sistema automatizado de inyección propuesto	23
4.	METODOS Y PROCEDIMIENTOS	23
4.1.	ANÁLISIS DE LOS PROCEDIMIENTOS TÉCNICOS PARA LA AUTOMATIZACIÓN DEL PROCESO DE FERTIRRIGACIÓN EN CULTIVOS DE ROSAS.....	23
4.1.1.	Recopilación de información técnica y científica sobre fertirrigación.	24
4.1.2.	Análisis de los parámetros de pH	25
4.1.3.	Análisis de los parámetros de CE.....	28
4.1.4.	Comparación de métodos manuales y automatizados de fertirrigación	30
4.1.5.	Determinación de los parámetros de control del sistema	32
4.1.6.	Frecuencia de la bomba N°2	34

4.2. DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DEL SISTEMA AUTOMATIZADO DE INYECCIÓN PARA LA DOSIFICACIÓN DE NUTRIENTES.....	34
4.2.1. Selección de componentes hidráulicos y eléctricos del sistema	36
4.2.2. Diseño del sistema hidráulico de inyección	38
4.2.3. Diseño del sistema eléctrico y electrónico	39
4.2.4. Desarrollo de la interfaz gráfica de supervisión y configuración.....	42
4.3. DESARROLLO E IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA DE CONTROL AUTOMATIZADO	44
4.3.1. Selección de instrumentación y control	45
4.3.2. Desarrollo del algoritmo de control para la inyección de fertilizantes	47
4.3.3. Implementación del sistema de monitoreo hidráulico.....	49
4.3.4. Dimensionamiento y cálculos de operación del sistema	51
4.3.5. Implementación del variador de frecuencia.....	54
4.3.6. Calculo de los parámetros del controlador pi	56
5. ANALISIS Y DISCUSION DE RESULTADOS	58
5.1. VALIDACIÓN DEL FUNCIONAMIENTO DEL SISTEMA AUTOMATIZADO	60
5.1.1. Validación de la comunicación RS485	60
5.1.2. Validación de la adquisición de variables del proceso	63
5.1.3. Validación hidráulica y pruebas de presión.....	67
5.1.4. Validación de la bomba secundaria mediante presión y curva H-Q	69
5.1.5. Análisis de las presiones pt-01	70
5.1.6. Presión de la línea de inyección pt-01	71
5.2. VALIDACIÓN DE LA BOMBA SECUNDARIA KSB TX03/2/70 T2.....	72
5.3. PRUEBAS DE CAUDAL	73
5.4. EVALUACION DE PERDIDAS	74
5.4.1. Perdidas por fracción	74

5.4.2.	Perdidas por accesorios.....	75
5.4.3.	Pérdidas totales	76
5.5.	VALIDACIÓN DEL SISTEMA DE MONITOR.....	77
5.5.1.	Validación del sensor de CE	78
5.5.2.	Validación de la comunicación RS485-Modbus RTU	80
5.6.	VALIDACIÓN DEL SISTEMA DE SUPERVISIÓN	81
5.6.1.	Interfaz gráfica M5 Stack tough	81
5.6.2.	Monitoreo en tiempo real.....	82
5.7.	VALIDACIÓN DEL CONTROLADOR PI	82
5.7.1.	Ajuste de los parámetros k_p y k_i	84
5.7.2.	Respuesta del controlador pi	85
5.7.3.	Comportamiento del variador de frecuencia	86
5.8.	EVALUACIÓN DEL SISTEMA AUTOMATIZADO	87
5.8.1.	Comparación entre el sistema manual y el automatizado	89
5.8.2.	Análisis del desempeño del sistema	91
5.9.	DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....	93
6.	PRESUPUESTO REFERENCIAL	95
7.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	97
7.1.	CONCLUSIONES.....	97
7.2.	RECOMENDACIONES.....	98
8.	REFERENCIAS.....	99
9.	ANEXOS.....	102

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Sistema manual de fertirrigación.	19
Figura 2. Sistema automatizado de Fertilización.....	20
Figura 3. Sistema de inyección y monitoreo de caudal implementado en el sistema de inyección para fertirrigación.	33
Figura 4. Línea de inyección equipada con dispositivos de control y monitoreo de flujo.	37
Figura 5. Arquitectura eléctrica y electrónica del sistema automatizado de fertirrigación.	40
Figura 6. Esquemático electrónico del circuito de control implementado.	41
Figura 7. Arquitectura de la interfaz gráfica de supervisión y configuración implementada en el sistema automatizado de fertirrigación.....	43
Figura 8. Diagrama de flujo del algoritmo de control implementado para el sistema automatizado de fertirrigación.....	48
Figura 9. Vista general del sistema automatizado de inyección para fertirrigación implementado.	59
Figura 10. Implementación física de las comunicaciones.	62
Figura 11. Validación de la comunicación RS485.	63
Figura 12. Comportamiento del potencial de hidrógeno (pH) durante las pruebas experimentales.	64
Figura 13. Comportamiento de la conductividad eléctrica (CE) durante las pruebas.	65
Figura 14. Comportamiento de las presiones PT-01 y PT-02 durante las pruebas experimentales.	65
Figura 15. Comportamiento del caudal durante las pruebas.	66
Figura 16. Curva característica H-Q de la bomba secundaria KSB TX 03/2/70T2.	69
Figura 17. Interfaz de HMI.....	78
Figura 18. Interfaz de monitoreo de PI.....	84
Figura 19. monitoreo del variador de frecuencia.....	86
Figura 20. Comparación del sistema manual y automatizado.	90
Figura 21. Sistema manual de operación.....	102
Figura 22. Recolección de datos CE.....	102
Figura 23. Comportamiento de variables.	102
Figura 24. Funcionamiento del Flujómetro.	102
Figura 25. Pantalla de variables a controlar.	103
Figura 26. Funcionamiento de Variador.....	103

Figura 27. Placa bomba Principal.....	103
Figura 28. Placa bomba secundaria.	103
Figura 29. Validación del tablero de control	104
Figura 30. Funcionamiento del Flujómetro.	104
Figura 31. Diagrama de fuerza.	105
Figura 32. Diagrama de control.....	106

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Campos de la Ciencia y Tecnología UNESCO	4
Tabla 2. Sistema de Tareas.	8
Tabla 3. Parámetros recomendados para cultivos de rosas.	13
Tabla 4. Conexión eléctrica del sensor pH.	14
Tabla 5. Dimensiones principales del electrodo de pH.	14
Tabla 6. Conexión eléctrica del sensor CE.	15
Tabla 7. Características físicas del electrodo CE.	16
Tabla 8. Características técnicas del sensor de presión.	16
Tabla 9. Ventajas del Rs485 en sistemas de fertirrigación.	18
Tabla 10. Componentes principales del sistema representado en el diagrama PID.	20
Tabla 11. Comparación entre sistemas tradicionales y automatizados de fertirrigación.	21
Tabla 12. Resultados del análisis de pH del agua de riego utilizada en el sistema de fertirrigación.	25
Tabla 13. Resultados del análisis de pH del suelo empleado en el cultivo de rosas.	26
Tabla 14. Valores de pH obtenidos en los análisis de laboratorio.	27
Tabla 15. Resultados del análisis de Conductividad eléctrica del agua de riego utilizada en el sistema de fertirrigación.	28
Tabla 16. Resultados del análisis de Conductividad eléctrica del suelo empleado en el cultivo de rosas.	29
Tabla 17. Valores de Conductividad eléctrica obtenidos en los análisis de laboratorio.	30
Tabla 18. Comparación entre métodos manuales y automatizados de fertirrigación.	32
Tabla 19. Parámetros de control definidos para el sistema automatizado.	34
Tabla 20. Componentes principales considerados en el diseño del sistema automatizado de inyección para fertirrigación.	35
Tabla 21. Clasificación de los componentes seleccionados para el sistema.	37
Tabla 22. Función de los elementos hidráulicos incorporados en el sistema de inyección.	38
Tabla 23. Componentes del sistema electrónico.	42
Tabla 24. Dispositivos de adquisición y control implementados en el sistema.	46
Tabla 25. Variables procesadas por el algoritmo de control.	49
Tabla 26. Variables hidráulicas monitoreadas durante la adquisición de datos.	50
Tabla 27. Configuración del sistema de adquisición hidráulica.	51
Tabla 28. Parámetros considerados para el dimensionamiento hidráulico.	52

Tabla 29. Variables utilizadas en los cálculos hidráulicos.	54
Tabla 30. Función del variador dentro del sistema automatizado.	55
Tabla 31. Configuración básica del variador de frecuencia RIONO R600.	55
Tabla 32. Parámetros del controlador PI.	57
Tabla 33. Variables utilizadas por el controlador PI.	58
Tabla 34. Parámetros de operación considerados en la validación.	59
Tabla 35. Estructura de la validación de pruebas.	60
Tabla 36. Configuración de la comunicación RS485 utilizada durante las pruebas.	61
Tabla 37. Resumen estadístico de las variables monitoreadas durante las pruebas.	64
Tabla 38. Lista de comprobación de la prueba de presión.	67
Tabla 39. Resumen de la adquisición de señales analógicas de los sensores de presión.	68
Tabla 40. Registro experimental para la validación de la respuesta del sistema.	73
Tabla 41. Dispositivos integrados en la red de monitoreo.	78
Tabla 42. Validación funcional del sensor de conductividad eléctrica.	79
Tabla 43. Validación de las lecturas de los dispositivos Modbus RTU.	80
Tabla 44. Registro de desempeño de la comunicación Modbus RTU.	81
Tabla 45. Elementos recomendados de la interfaz HMI.	82
Tabla 46. Criterios de actualización para el monitoreo en tiempo real.	82
Tabla 47. Efecto de los parámetros del controlador PI.	83
Tabla 48. Indicadores de respuesta del controlador PI.	83
Tabla 49. Registro para el ajuste de los parámetros PI.	85
Tabla 50. Indicadores de respuesta del controlador PI.	85
Tabla 51. Pruebas funcionales del variador RIONO R600.	87
Tabla 52. Evaluación hidráulica de las bombas empleadas.	89
Tabla 53. Comparación en el sistema manual y el sistema automatizado.	90
Tabla 54. Indicadores para el análisis del desempeño del sistema.	92
Tabla 55. Principales fortalezas identificadas en el sistema automatizado.	94
Tabla 56. Materiales y costos.	96
Tabla 57. Costos de mano de obra.	97

1. INFORMACIÓN GENERAL

Tema del proyecto: Diseño e implementación de un sistema de inyección para fertilizante en cultivo de Rosas.

Modalidad de Titulación:

MODALIDAD DE TITULACIÓN	HOMOLOGACIONES PARA INFORME FINAL DE TITULACIÓN	SELECCIÓN
Propuesta tecnológica	Informe de propuesta tecnológica	X
	Patente, Modelo de utilidad, Certificado de propiedad intelectual.	
	Artículo científico	
Proyecto de investigación	Informe de Proyecto de investigación	
	Artículo científico	
	Patente, Modelo de utilidad, Certificado de propiedad intelectual.	
Exámen de indicadores de RDA		

Trabajo de Titulación Vinculado al Proyecto:

Modelado matemático en ingeniería: enfoques generales y aplicaciones.

Equipo de Trabajo del Trabajo de Titulación:

- Farinango Landeta Bryan Alexander
- Ing. Luigi Orlando Freire Martínez

Área de Conocimiento:

Basándonos en la norma CINE-UNESCO, se describen a continuación las áreas de conocimiento:

Tabla 1 Campos de la Ciencia y Tecnología UNESCO

3311.02	3311.01	3308 Ingeniería Agrícola
Ingeniería de Control	Tecnología de la Automatización	3313.02 Automatización de proceso Industriales

Línea de Investigación:

Tecnología industrial gestión de la producción, riesgo y seguridad laboral.

Sublíneas de investigación de la Carrera:

Automatización e inteligencia artificial aplicada a sistemas electromecánicos.

2. INTRODUCCIÓN

La fertirrigación constituye una técnica de gran importancia dentro de los sistemas agrícolas modernos, debido a que permite aplicar de manera conjunta el agua de riego y los nutrientes necesarios para el desarrollo de los cultivos [1]. Este método facilita una distribución más precisa y eficiente de los fertilizantes, contribuyendo a mejorar el aprovechamiento de los recursos y a reducir las pérdidas ocasionadas por aplicaciones convencionales. En los últimos años, la necesidad de incrementar la productividad agrícola, optimizar el consumo de agua y fertilizantes y disminuir el impacto ambiental ha impulsado el desarrollo e implementación de sistemas de fertirrigación automatizados, capaces de controlar y ajustar el suministro de agua y nutrientes de acuerdo con las necesidades específicas del cultivo [2]. En este contexto, la agricultura de precisión integra herramientas de monitoreo, automatización, sensórica y análisis de datos que permiten optimizar el uso del agua, los fertilizantes y otros insumos agrícolas, incrementando la productividad y reduciendo el impacto ambiental [3].

Dentro de este escenario, la floricultura representa uno de los sectores agrícolas de mayor importancia para la economía ecuatoriana, destacándose la producción de rosas por su elevada calidad y reconocimiento en los mercados internacionales [4]. Las condiciones climáticas de la región interandina favorecen el cultivo de flores de exportación; sin embargo, este sistema de producción demanda un mejor eficiente del riego y de la nutrición vegetal para garantizar la calidad del producto final y mantener la competitividad del sector [5]. Asimismo, el incremento de las áreas destinadas al cultivo protegido ha generado una mayor demanda de agua y ha motivado el desarrollo de estrategias orientadas a optimizar su aprovechamiento mediante tecnologías de monitoreo y gestión sostenible [6].

La fertirrigación constituye una de las técnicas más empleadas para suministrar simultáneamente agua y nutrientes al cultivo mediante el sistema de riego, permitiendo distribuir fertilizantes al cultivo mediante el sistema de goteo, permitiendo distribuir fertilizantes solubles de forma uniforme sobre la zona radicular de las plantas [7]. Esta técnica incrementa la eficiencia en el aprovechamiento de fertilizantes, reduce pérdidas por lixiviación y optimiza el consumo de agua, siendo ampliamente utilizado en cultivos tecnificados de alto valor comercial [8]. No obstante, para alcanzar un funcionamiento adecuado resulta indispensable mantener un control permanente sobre las variables que intervienen en la preparación y aplicación de la solución nutritiva [9].

Entre las variables más importantes del proceso de fertirrigación se encuentran el potencial de hidrogeno (pH) y la conductividad eléctrica (CE), parámetros que determinan la disponibilidad de nutrientes y la concentración de sales presentes en la solución nutritiva [10]. Un valor inadecuado de pH puede limitar la absorción de macro y micronutrientes por parte de la planta, mientras que una conductividad eléctrica excesiva o deficiente afecta directamente el desarrollo vegetativo y la productividad del cultivo [11]. Por esta Razón, el monitoreo continuo de estas variables constituye un aspecto fundamental para mantener condiciones óptimas durante el proceso de fertirrigación [12].

A pesar de las ventajas que ofrece esta técnica, en numerosos sistemas agrícolas la dosificación de fertilizantes continúa realizándose mediante procesamientos manuales o con un bajo nivel de automatización, provocando variaciones en la concentración de nutrientes suministrados durante el riego [13]. Estas variaciones generan inestabilidad en los valores de pH y conductividad eléctrica, reduciendo la eficiencia del proceso y ocasionando un mayor consumo de agua y fertilizantes [14]. En consecuencia, resulta necesario implementar sistemas automatizados capaces de supervisar continuamente las variables del proceso y realizar acciones de control que permitan mantener condiciones estables de operación [15].

En este contexto, este trabajo propone diseñar e implementar un sistema automatizado de fertilización para el cultivo de rosas mediante el monitoreo de variables de pH si es necesaria y conductividad eléctrica programable para monitorear el proceso de inyección de fertilizantes y controlar su operación. Tiene como objetivo mejorar la estabilidad de las variables del proceso y fortalecer la aplicación de tecnología de agricultura de precisión en los sistemas de producción de flores.

2.1. SITUACIÓN PROBLEMÁTICA

En la producción de Rosas, el manejo adecuado de la fertilización es un factor determinante para garantizar la calidad y el rendimiento del cultivo. Sin embargo, en muchos sistemas actuales la preparación y dosificación de soluciones nutritivas se realizan manual lo que es difícil identificar la cantidad de nutrientes que está recibiendo las plantas.

Esta situación genera dificultades en el control de variables críticas como el pH Y CE (conductividad eléctrica), las cuales influyen directamente en la disponibilidad y absorción de

nutrientes por parte de las plantas. La falta de un control preciso puede provocar desequilibrio nutricional, afectando tanto la calidad como del rendimiento del cultivo.

Adicionalmente, la dependencia de la intervención humana en el proceso de dosificación incrementa la probabilidad de errores operativos variaciones en las concentraciones de fertilizantes y un uso ineficiente de los recursos también la ausencia de un monitoreo en tiempo real limita la capacidad de realizar ajustes oportunos, lo que reduce la eficiencia del sistema de fertirrigación.

Por otra parte, los sistemas tradicionales carecen de mecanismos integrados que permitan regular de manera automatiza la inyección de fertilizante en función de las condiciones requeridas por el cultivo, lo que dificulta parámetros estables durante todo el proceso.

Ante esta situación, surge la necesidad de desarrollar soluciones tecnológicas orientadas a la automatización del proceso de fertirrigación, que permitan mejorar la precisión en la dosificación de nutrientes, óptimos y el uso de recursos garantizando condiciones adecuadas para el cultivo de rosas.

2.2. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

En los sistemas de fertirrigación utilizados para el cultivo de rosas, la dosificación de nutrientes se realiza principalmente mediante procedimientos manuales, lo que dificulta mantener un control preciso de parámetros fundamentales como la conductividad eléctrica (CE) de la solución nutritiva.

2.3. OBJETO Y CAMPO DE ACCIÓN

2.3.1. Objetivo de investigación

El objetivo de investigación se centra en el sistema automatizado de fertirrigación para el cultivo de rosas, orientado al control preciso del pH, la conductividad eléctrica (CE) y la dosificación de nutrientes mediante la integración de componentes electromecánicos y sistemas de control.

2.3.2. Campo de acción

Este campo aborda el estudio y aplicación de sistema de distribución eficiente de agua en la agricultura, mediante tecnología de riego adaptadas a clima y al cultivo, integrando conocimiento de ingeniería de control (3311.02) y tecnología de la Automatización (3311.01)

2.4. BENEFICIARIOS

2.4.1. Directo

- Jessy Landeta, agricultora y administradora de la finca.

2.4.2. Indirecto

- Ingenieros encargados del cultivo y compradores de rosas.

2.5. JUSTIFICACIÓN

El presente proyecto justifica desde el ámbito académico, ya que permite aplicar conocimiento teórico y práctico relacionados con la automatización industrial, control de procesos y uso de sensores para la medición de variables como pH (potencial de hidrogeno) CE (conductividad eléctrica). Además, contribuye al crecimiento y desarrollo de competencias en diseños de sistemas automatizados, integración de dispositivos y programación de controlador

Desde el punto de vista metodológico, el proyecto implica el diseño, implementación y validación de un sistema de control. Lo que fortalece habilidades en la resolución de problemas mediante el uso de herramientas técnicas y criterios de ingeniería.

El desarrollo del sistema de inyección representa una solución aplicable en sectores florícolas donde la optimización de los procesos de fertilización es fundamental para mejorar la eficiencia operativa, reducir errores humanos y disminuir el desperdicio de recursos como agua y fertilizantes, considerando además las limitaciones técnicas y económicas propias de los pequeños productores.

Finalmente, desde una perspectiva social y productiva, el proyecto contribuye a la modernización de prácticas agrícolas en pequeñas unidades de producción, favoreciendo una

gestión más eficiente y sostenible, lo cual impacta positivamente en calidad del cultivo de rosas o en la competitividad de estos micro emprendimientos dentro del sector productivo.

2.6. OBJETIVOS

2.6.1. General

Implementar un sistema de inyección automatizado para sistema de fertirrigación en una florícola mediante la integración de un sistema de control automatizado.

2.6.2. Específicos

- Investigar los parámetros y requerimientos técnicos del proceso de fertirrigación en cultivos de rosas, considerando variables con pH (potencial de hidrogeno) y CE (Conductividad eléctrica) para la mejora en la dosificación de nutrientes.
- Diseñar un sistema de inyección automatizado para la fertirrigación, garantizando la dosificación precisa y controlada de nutrientes en el cultivo.
- Implementar el sistema de fertirrigación automatizado en la finca logrando la integración funcional de todos los componentes y su correcta operación.
- Validar el funcionamiento del sistema automatizado de fertirrigación mediante pruebas de monitoreo y supervisión de las variables del proceso en el cultivo de rosas.

2.6.3. Sistema de tareas

Tabla 2. Sistema de Tareas.

Objetivos específicos	Actividades (tareas)	Resultados esperados	Técnicas, Medios e Instrumentos
Investigar los parámetros y requerimientos técnicos del proceso de fertirrigación en cultivos de rosas, considerando variables con pH (Potencial de hidrogeno) y CE (Conductividad eléctrica) para la mejora en la dosificación de nutrientes.	Recopilación de información técnica, científica sobre sistemas de fertirrigación.	Identificación de parámetros óptimos de fertirrigación.	Revisión bibliográfica ,Artículos y tesis , Ficha bibliográfica
	Analizar parámetros de pH(Potencial de Hidrogeno) CE (Conductividad eléctrica) y dosificación utilizados en cultivos de rosas.	Identificación de mejoras en la eficiencia y control del proceso de fertirrigación mediante la automatización.	Observación técnica, Sistema de fertirrigación, Ficha de observación
	Comparación métodos manuales y automatizados aplicados en fertirrigación.	Obtención de técnicas y parámetros para el diseño del sistema a implementar.	Análisis comparativo, Métodos de fertirrigación, Tabla comparativa
Diseñar un sistema de inyección automatizado para la fertirrigación, garantizando la dosificación precisa	Selección los componentes hidráulicos, eléctricos y electrónicos requeridos para el diseño del sistema de inyección automatizado.	Componentes definidos y especificaciones técnicas establecidas para la construcción del sistema de inyección.	Revisión documental, Catálogos técnicos, Ficha técnica
	Diseño y construcción del sistema de inyección integrando la línea hidráulica,	Sistema automatizado de inyección	Diseño, Sistema hidráulico, Software de creación

y controlada de nutrientes en el cultivo.	dispositivos de dosificación y elementos de control	ensamblado y listo para operación.	
	Implementación la lógica de control para regular y monitorear la dosificación de nutrientes durante el proceso de fertirrigación.	Sistema de control funcional cargad en el controlador y operativo durante las pruebas.	Montaje, Componentes hidráulicos , Herramientas de montaje
Implementar el sistema de fertirrigación automatizado en el micro emprendimiento logrando la integración funcional de todos los componentes y su correcta operación.	Investigación sobre sensores pH (potencial de hidrogeno), CE(Conductividad Eléctrica), caudal microcontroladores (arduino nano) y algoritmos de control para fertirrigación automatizada.	Un informe técnico de selección de tecnologías y componentes.	Programación, Sistema electrónico, Entorno de programación
	Desarrollo de esquemas hidráulicos, eléctricos y de control del sistema de inyección, incluyendo la disposición de componentes.	Conjunto completo de planos CAD (hidráulicos y eléctricos) y diagramas de control.	Medición, Solución nutritiva, Sensores de pH y CE
	Parámetros de funcionamiento, tolerancias y requisitos de compatibilidad de materiales con los fertilizantes.	Documento con las especificaciones técnicas detalladas para cada componente y el sistema general.	Experimentación, Prototipo, Ficha de registro

Validar el funcionamiento del sistema automatizado de fertirrigación mediante pruebas de monitoreo y supervisión de las variables del proceso en el cultivo de rosas.	Calibración de los sensores y dispositivos de monitoreo incorporando en el sistema (pH,CE).	Sistema calibrado y operando dentro de los rangos establecidos para las pruebas.	Calibración, Sensores, Instrumentos de medición
	Pruebas de funcionamiento de las electroválvulas y mecanismos de dosificación implementados en el sistema automatizado de inyección.	Correcta activación y desactivación de dispositivos de control durante la operación del sistema.	Pruebas operativas, Sistema automatizado ,Registro de funcionamiento
	Evaluación del comportamiento general del sistema durante las pruebas de operación continua.	Informe técnico que valide el correcto funcionamiento del sistema automatizado de fertirrigación.	Validación, Resultados experimentales, Ficha de validación

3. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA

3.1. ANTECEDENTES

En este apartado se presentan investigaciones y proyectos desarrollados anteriormente relacionados con la automatización de sistemas de fertirrigación, principalmente aquellos orientados al monitoreo y control de la conductividad eléctrica (CE). También se consideran trabajos aplicados a cultivos de rosas y propuestas de automatización que integran sensores, controladores y actuadores.

Los antecedentes permiten identificar las tecnologías utilizadas previamente, los métodos de control implementados y su relación con el sistema automatizado de fertirrigación propuesto en el presente proyecto.

3.1.1. Sistema automatizado de fertirrigación

Los sistemas automatizados permiten adquirir información de las variables involucradas en el proceso, procesarla mediante una unidad de control y ejecutar acciones sobre bombas, válvulas y dispositivos de dosificación. De esta manera se establece una relación entre la instrumentación y los elementos electromecánicos del sistema. Ahmad, Subrata y Arif desarrollaron un sistema automático de fertirrigación para invernadero utilizando un enfoque denominado Speaking Plant Approach. En este trabajo se emplearon sistemas de adquisición y procesamiento para determinar condiciones del cultivo y utilizar la información obtenida como entrada para accionar una bomba eléctrica encargada del suministro de agua y nutrientes. El trabajo constituye un antecedente de la integración entre adquisición de información, procesamiento y accionamiento eléctrico dentro de un sistema de fertirrigación [16].

Aunque el sistema desarrollado por dichos autores utilizó variables y métodos diferentes a los planteados en el presente proyecto, demuestra el principio fundamental de un sistema automatizado: adquirir información del proceso, procesarla mediante una unidad programable y ejecutar acciones sobre los dispositivos correspondientes.

Para el presente proyecto, este principio se aplica principalmente al monitoreo de las condiciones de la solución nutritiva y del sistema hidráulico. Los sensores proporcionarán información al controlador y este gestionará los elementos electromecánicos que intervienen en la operación del sistema [17].

3.1.2. Antecedentes del control de pH y CE en rosas

El pH y la conductividad eléctrica constituyen variables utilizadas para caracterizar las condiciones de una solución nutritiva. Debido a ello, diferentes investigaciones relacionadas con cultivos bajo condiciones controladas han estudiado su comportamiento y su utilización dentro de sistemas de fertirrigación.

Lykas, Katsoulas, Giaglaras y Kittas estudiaron el comportamiento del pH y la conductividad eléctrica en una solución nutritiva recirculada empleada en un cultivo de rosas sin suelo. La investigación analizó la evolución de estas variables en función de las condiciones de operación de la solución nutritiva. El estudio resulta particularmente importante como antecedente del presente proyecto debido a que está relacionado directamente con rosas y demuestra la necesidad de considerar conjuntamente el pH y la CE durante el manejo de la solución nutritiva [18].

Desde el punto de vista electromecánico, estos parámetros pueden ser transformados en señales mediante sensores y posteriormente utilizados por un controlador para supervisar el funcionamiento del sistema. De esta forma, el análisis realizado por Lykas et al. proporciona un fundamento para considerar el pH y la CE como variables de entrada del sistema automatizado propuesto [18].

El presente proyecto se diferencia de dicho estudio porque no pretende desarrollar un modelo agronómico del cultivo ni determinar la influencia de estas variables sobre la productividad de las rosas. Su alcance se concentra en diseñar e implementar el sistema capaz de adquirir, procesar y utilizar dichas variables para el monitoreo y control del proceso de fertirrigación.

3.2. FUNDAMENTOS DE LA FERTIRRIGACIÓN

La fertirrigación consiste en la incorporación de fertilizantes solubles mediante el agua utilizada para el riego, permitiendo suministrar simultáneamente agua y nutrientes al cultivo.

Desde el punto de vista técnico, estos sistemas están constituidos por depósitos de solución fertilizante, sistemas de bombeo, tuberías, filtros, válvulas, dispositivos de inyección e instrumentos de medición. La integración de estos elementos permite transportar e incorporar la solución fertilizante al flujo principal de agua.

3.2.1. Fertirrigación en el cultivo de rosas

En el cultivo de rosas, la fertirrigación permite realizar el suministro de nutrientes mediante el sistema de riego. Para supervisar las condiciones de la solución nutritiva se utilizan principalmente variables como el pH y la conductividad eléctrica.

El monitoreo de estas variables permite disponer de información sobre las características de la solución y constituye la base para implementar estrategias de automatización del proceso de dosificación.

3.3. VARIABLES DE CONTROL EN FERTIRRIGACIÓN

3.3.1. Potencial de hidrogeno (pH)

El pH representa el grado de acidez o alcalinidad de una solución. En fertirrigación constituye una variable importante debido a su relación con las condiciones químicas de la solución nutritiva [18].

La incorporación de sensores permite realizar mediciones continuas y transmitir esta información hacia el sistema de control para su procesamiento y visualización.

3.3.2. Conductividad eléctrica (CE)

La conductividad eléctrica representa la capacidad de una solución para conducir corriente eléctrica y está relacionada con la concentración de iones disueltos.

En los sistemas de fertirrigación, la CE se utiliza como una variable para supervisar la concentración general de la solución nutritiva. Su medición puede integrarse al sistema automatizado para establecer acciones sobre el proceso de dosificación [18].

Tabla 3. Parámetros recomendados para cultivos de rosas.

Parámetro	Rango recomendado
pH	6.0 – 7.0
Conductividad eléctrica (CE)	1.5 – 2.5 mS/cm

3.4. INSTRUMENTACION DEL SISTEMA

Los sensores constituyen los elementos encargados de adquirir las variables físicas y químicas involucradas en el funcionamiento del sistema de fertirrigación. Las señales obtenidas son procesadas por la unidad de control para supervisar las condiciones del proceso.

3.4.1. Sensores de pH y conductividad eléctrica (CE) con comunicación RS485

El sensor incorpora una interfaz de comunicación digital RS485 basada en el protocolo Modbus RTU, lo que permite su integración con sistemas de monitoreo y control industrial. Esta tecnología proporciona una transmisión de datos robusta y confiable, especialmente en entornos donde existen interferencias electromagnéticas o largas distancias de cableado. Para su funcionamiento, el dispositivo requiere una alimentación de corriente continua comprendida entre 7 y 30 VDC. La conexión eléctrica se realiza mediante cuatro conductores, destinados a la alimentación y comunicación del sensor.

Tabla 4. Conexión eléctrica del sensor pH.

Color del cable	Función
Café (Brown)	Alimentación positiva (V+)
Negro (Black)	Alimentación negativa (GND)
Amarillo (Yellow)	Línea RS485 A
Azul (Blue)	Línea RS485 B

Fuente: Manual técnico del sensor pH RS485.

La transmisión de datos se efectúa a través de las líneas diferenciales RS485 A y RS485 B, las cuales permiten reducir los efectos del ruido eléctrico y mejorar la confiabilidad de la comunicación. Esta característica resulta especialmente útil en aplicaciones agrícolas automatizadas donde los sensores pueden ubicarse a varios metros del sistema de control [19].

El sensor también dispone de un sistema de calibración que permite mejorar la exactitud de las mediciones dentro de diferentes rangos de operación. Además, incorpora elementos electrónicos internos destinados a incrementar la impedancia del sistema de medición, contribuyendo a reducir interferencias u mejorar la estabilidad de las lecturas durante el monitoreo continuo de la solución.

Tabla 5. Dimensiones principales del electrodo de pH.

Parámetro	Valor
Longitud total	160 mm
Diámetro del cuerpo	28 mm

Rosca de montaje	3/4" NPT
Longitud de inserción	90 mm
Longitud del extremo sensor	50 mm

Fuente: Manual técnico del sensor pH RS485.

El sensor de conductividad eléctrica utilizado en el presente proyecto incorpora una interfaz de comunicación digital RS485 mediante protocolo Modbus RTU, permitiendo la transmisión confiable de información hacia el sistema de control. Esta tecnología es ampliamente utilizada en aplicaciones industriales y agrícolas debido a su capacidad para operar en ambientes con ruido electromagnético y en instalaciones donde se requieren distancias considerables entre los dispositivos de medición y el controlador principal.

Para su funcionamiento, el sensor requiere una alimentación de corriente continua comprendida entre 7 y 30 VDC. La conexión eléctrica se realiza mediante cuatro conductores destinados a la alimentación y comunicación de datos [20].

Tabla 6. Conexión eléctrica del sensor CE.

Color del cable	Función
Café (Brown)	Alimentación positiva (V+)
Negro (Black)	Alimentación negativa (GND)
Amarillo (Yellow)	Línea RS485 A
Azul (Blue)	Línea RS485 B

Fuente: Manual técnico del sensor CE RS485.

La transmisión de datos se efectúa a través de las líneas diferenciales RS485 A y RS485 B, las cuales permiten reducir los efectos del ruido eléctrico y mejorar la confiabilidad de la comunicación. Esta característica resulta especialmente útil en aplicaciones agrícolas automatizadas donde los sensores pueden ubicarse a varios metros del sistema de control [20].

El electrodo de conductividad eléctrica este fabricado en material plástico resistente a la corrosión y diseñado para aplicaciones de monitoreo continuo en solución y diseñado para aplicaciones de monitoreo continuo en soluciones acuosas. Su estructura presenta un peso reducido y elevada resistencia mecánica, características que favorecen su utilización en ambientes agrícolas donde pueden existir condiciones variables de operación

Tabla 7. Características físicas del electrodo CE.

Parámetro	Valor
Tipo de electrodo	Plástico
Constante de celda	1.0
Longitud total	133 mm
Diámetro del sensor	12.8 mm
Rosca de montaje	1/2" NPT
Material	Plástico resistente a la corrosión

Fuente: Manual técnico del sensor CE RS485.

3.4.2. Sensor de presión

El sensor de presión permite supervisar las condiciones hidráulicas de las líneas del sistema. La información obtenida puede utilizarse para verificar el funcionamiento del sistema de bombeo y detectar condiciones anormales durante la operación [21].

Para el desarrollo del presente proyecto se seleccionó un transmisor electrónico de presión con un rango de medición de 0 a 10 bar, alimentación de 12 a 24 VDC (admite de 8 a 30 VDC) y salida analógica estandarizada de 4–20 mA, características que permiten su integración con sistemas de adquisición de datos y control industrial. El sensor dispone de conexión eléctrica mediante conector M12 de Tres pines, tiempo de respuesta inferior a 5 ms, exactitud de $\pm 0,5\%$ del rango de medición y materiales en acero inoxidable para las partes en contacto con el fluido, lo que favorece su utilización en aplicaciones hidráulicas y de automatización [22].

Tabla 8. Características técnicas del sensor de presión.

Parámetro	Especificación
Tipo	Transmisor electrónico de presión
Rango de medición	0–10 bar
Alimentación	12–24 VDC (8–30 VDC)
Señal de salida	4–20 mA
Tipo de salida	Analógica de dos hilos
Conexión eléctrica	M12 de 3 pines

Tiempo de respuesta	< 5 ms
Material en contacto con el fluido	Acero inoxidable
Aplicación	Medición de presión en sistemas hidráulicos

3.4.3. Medición de caudal

El caudal permite conocer la cantidad de fluido que circula por el sistema hidráulico. Para su supervisión pueden utilizarse instrumentos como flujómetro y rotámetros, permitiendo verificar las condiciones de circulación durante el proceso de fertirrigación [23].

3.5. ELEMENTOS HIDRAULICOS DEL SISTEMA

El sistema hidráulico permite transportar el agua y las soluciones fertilizantes entre los diferentes componentes del sistema. Está constituido principalmente por bombas, tuberías, filtros, válvulas y elementos de regulación.

3.5.1. Sistema de bombeo y regulación

El sistema de fertirrigación propuesto incorpora dos bombas con funciones diferenciadas dentro del proceso. La primera corresponde a la bomba principal de agua, encargada de impulsar el caudal necesario a través de la red hidráulica y mantener las condiciones de presión requeridas para el funcionamiento del sistema.

La segunda corresponde a la bomba de inyección de fertilizante, cuya función es suministrar la solución fertilizante desde el depósito hacia la línea principal de agua. Su operación permite incorporar los nutrientes de manera controlada durante el proceso de fertirrigación. El funcionamiento coordinado de ambas bombas es fundamental para garantizar una adecuada mezcla entre el agua de riego y la solución fertilizante. La bomba principal asegura las condiciones hidráulicas del sistema, mientras que la bomba de inyección interviene directamente en el proceso de dosificación [24].

Adicionalmente, el sistema incorpora válvulas de regulación, entre ellas una válvula de aguja, utilizada para realizar ajustes finos del caudal en la línea de inyección y contribuir a un suministro más controlado de la solución fertilizante.

3.6. AUTOMATIZACIÓN Y COMUNICACIÓN INDUSTRIAL

La automatización permite integrar los sensores, dispositivos de procesamiento y elementos de accionamiento para supervisar y controlar el funcionamiento del sistema de fertirrigación.

El sistema de control recibe las variables medidas, las procesa y ejecuta las acciones correspondientes de acuerdo con la lógica programada.

3.6.1. Comunicación RS485 y Modbus RTU

RS485 es un estándar de comunicación serial diferencial utilizado ampliamente en sistemas de automatización debido a su resistencia frente a interferencias electromagnéticas y su capacidad para comunicar varios dispositivos. El protocolo Modbus RTU permite estructurar el intercambio de información entre el controlador y los sensores conectados mediante RS485.

En el sistema propuesto, esta comunicación permite adquirir principalmente las mediciones proporcionadas por los sensores de pH y CE.

El sensor opera mediante protocolo Modbus RTU, utilizando una configuración predeterminada de:

- Dirección de dispositivos: 1.
- Velocidad de transmisión: 4800 baudios.
- 8 bits de datos.
- 1 bit de parada.

Esta configuración permite la lectura remota de las variables medidas a través de registros Modbus, facilitando su integración con controladores y microcontrolador del sistema [25].

Tabla 9. Ventajas del Rs485 en sistemas de fertirrigación.

Ventaja	Beneficio en el proyecto
Alta inmunidad al ruido	Mayor estabilidad en la lectura de sensores
Comunicación a larga distancia	Permite instalar sensores lejos del controlador
Compatibilidad industrial	Integración con sensores RS485 comerciales
Bajo costo	Reduce costos de implementación
Comunicación estable	Mejora la confiabilidad del sistema

3.7. SISTEMAS DE FERTIRRIGACIÓN SEGÚN SU NIVEL DE AUTOMATIZACIÓN

En los sistemas tradicionales de fertirrigación, la preparación y dosificación de fertilización se realiza de forma manual sin una automatización adecuada. Esto genera variaciones en la concentración de la solución nutritiva errores en la dosificación y desperdicio de recursos.

3.7.1. Sistema tradicional de fertirrigación

Los sistemas tradicionales de fertirrigación se caracterizan por depender principalmente de la intervención del operador para la preparación, dosificación y aplicación de fertilizantes. En estos sistemas, el monitoreo de parámetros como pH y CE suele realizarse de forma manual, lo que puede generar variación en la concentración de nutrientes suministrados al cultivo.

La operación manual puede ocasionar errores en la dosificación de fertilizante debido a factores como la experiencia del operador, la función de medición y la interpretación de los datos obtenidos. Además, requiere una supervisión constante para garantizar el correcto funcionamiento del proceso de fertirrigación.

A pesar de su simplicidad y bajo costo inicial, los sistemas tradicionales presentan limitaciones relacionadas con la precisión del control el uso eficiente de los recursos y la capacidad de respuesta ante cambios en las condiciones del cultivo [26].

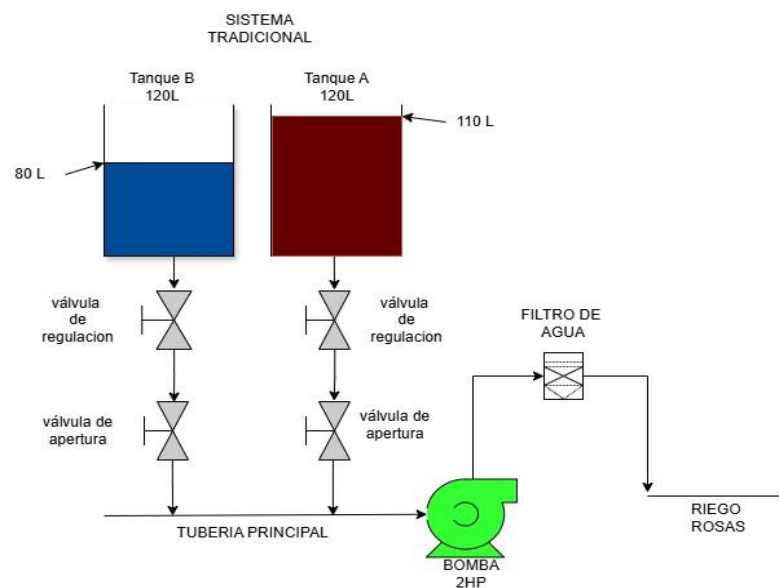


Figura 1. Sistema manual de fertirrigación.

3.7.2. Sistema automatizado de fertirrigación

Los sistemas automatizados de fertirrigación incorporan tecnologías de monitoreo, control y adquisición de datos para gestionar de forma automática la aplicación de agua y fertilizante. Estos sistemas utilizan sensores y controladores que permiten supervisar variables críticas del proceso en tiempo real.

La automatización facilita el control continuo de parámetro como pH, CE y caudal, permitiendo una dosificación más precisa de nutrientes y reduciendo la intervención humana. Asimismo, contribuye a optimizar el uso de fertilizante, disminuir desperdicios y mejorar la eficiencia operativa del sistema [26].

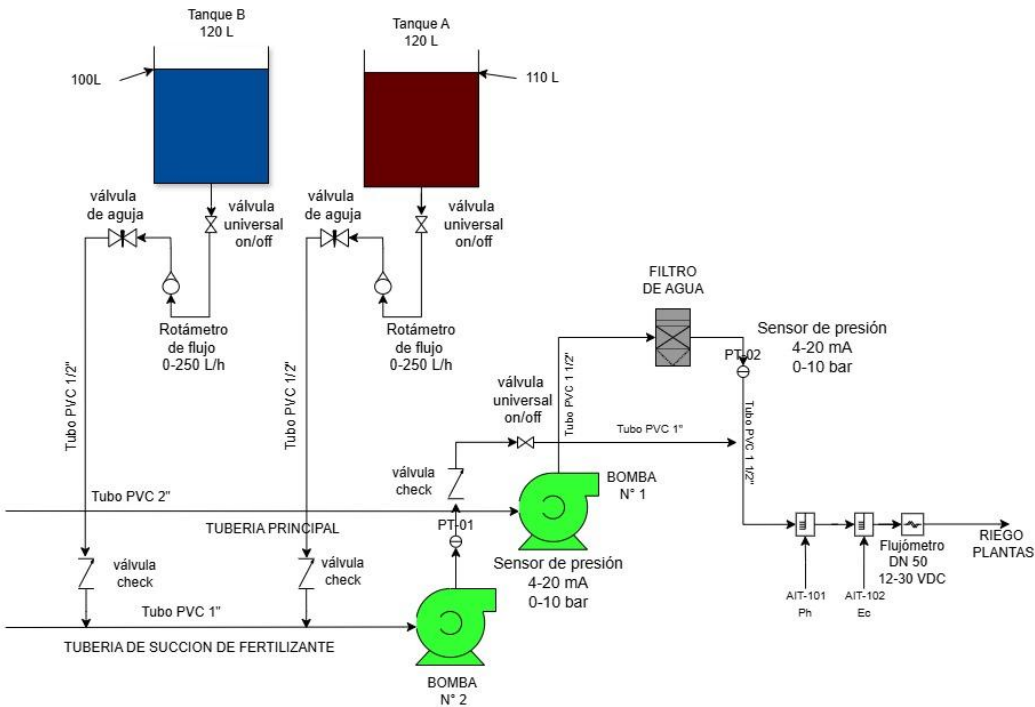


Figura 2. Sistema automatizado de Fertilización.

Tabla 10. Componentes principales del sistema representado en el diagrama PID.

Ítem	Componente	Cantidad	Especificación / función
1	Tanque A	1	120 L
2	Tanque B	1	120 L
3	Tubería PVC	6m	1/2"
4	Tubería PVC	6m	1"
5	Tubería PVC	6m	1 1/2"
6	Tubería PVC	6m	2"
7	Válvula de aguja	2	Regulación de caudal
8	Válvula universal ON/OFF	3	Apertura y cierre de flujo
9	Válvula check	3	Evita el retorno del flujo
10	Rotámetro	2	0-250 L/h

11	Bomba N.º 1	1	Bomba de succión de agua
12	Bomba N.º 2	1	Bomba de inyección de fertilizante
13	Sensor de presión PT01	1	4–20 mA, 0–10 bar
14	Sensor de presión PT02	1	4–20 mA, 0–10 bar
15	Filtro de agua	1	Filtración de agua
16	Sensor AIT-101	1	Medición de pH
17	Sensor AIT-102	1	Medición de conductividad eléctrica (CE)
18	Flujómetro DN50	1	Medición de caudal de agua

El desarrollo de tecnologías de automatización en la agricultura ha permitido incrementar la productividad y mejorar la calidad de los cultivos mediante procesos más controlados y confiables.

Tabla 11. Comparación entre sistemas tradicionales y automatizados de fertirrigación

Característica	Sistema tradicional	Sistema automatizado
Monitoreo de pH y CE	Manual	Automático
Dosificación de fertilizantes	Depende del operador	Controlada por el sistema
Precisión	Variable	Alta
Intervención humana	Alta	Baja
Consumo de fertilizantes	Mayor desperdicio	Uso optimizado
Registro de datos	Manual o inexistente	Automático
Tiempo de supervisión	Elevado	Reducido

3.8. COMPONENTES DE CONTROL Y SUPERVISIÓN

3.8.1. Variador de frecuencia

El variador de frecuencia (Variable Frequency Drive, VFD) es un dispositivo electrónico de potencia diseñado para controlar la velocidad y el par de los motores de corriente alterna mediante la regulación de la frecuencia y el voltaje suministrados al motor. Su funcionamiento se basa en la conversión de la tensión de entrada de corriente alterna a corriente continua y posteriormente a una señal de corriente alterna de frecuencia variable, permitiendo modificar la velocidad de giro del motor de forma continua y eficiente [27].

En aplicaciones industriales y agrícolas, los variadores de frecuencia son ampliamente utilizados para accionar bombas, ventiladores y otros equipos que requieren un control preciso de velocidad. Su implementación permite optimizar el consumo energético, reducir los esfuerzos mecánicos durante el arranque y la detención del motor, prolongar la vida útil de los

equipos y adaptar el funcionamiento del sistema a las condiciones de operación requeridas. Estas características hacen que los variadores de frecuencia sean una solución eficiente para sistemas de bombeo utilizados en procesos de riego y fertirrigación [28].

3.8.2. M5 Stack tough

El M5Stack Tough es una plataforma de desarrollo industrial basada en el microcontrolador ESP32, diseñada para aplicaciones de monitoreo, control y automatización. Este dispositivo integra una pantalla táctil a color, capacidad de procesamiento, conectividad inalámbrica y múltiple interfaz de comunicación, permitiendo la integración entre usuario y los sistemas a supervisar. La combinación de estas características facilita su utilización como interfaz de supervisión y unidad de procesamiento dentro de aplicaciones industriales y agrícolas.

La unidad incorpora un procesador ESP32 de doble núcleo con arquitectura de 32 bits y frecuencia de operación de hasta 240MHZ, proporcionando la capacidad necesaria para ejecutar tareas de adquisición de datos, visualización de información y control de dispositivos externos. Además, dispone de memoria interna y recursos de hardware que permiten gestionar múltiples procesos de manera simultánea [29].

Entre sus principales características se encuentran la conexión wifi y Bluetooth lo que permite la integración con sistemas de comunicación inalámbrica y plataformas de supervisión remota. Estas capacidades facilitan la transmisión de datos y la implementación de aplicaciones relacionadas con la agricultura inteligente y la automatización de procesos.

Debido a su capacidad de procesamiento facilidad de integración y disponibilidad de recursos de comunicación, el M5Stack Tough constituye una alternativa adecuada para aplicaciones que requieren monitoreo en tiempo real, visualización de variables de proceso y control de dispositivos dentro de entornos agrícolas automatizados [29].

3.9. SISTEMA AUTOMATIZADO DE INYECCIÓN

El sistema de inyección constituye el conjunto encargado de incorporar las soluciones fertilizantes al agua utilizada durante el proceso de fertirrigación.

Su funcionamiento integra elementos hidráulicos, sensores, dispositivos eléctricos y una unidad de control para supervisar las variables involucradas y ejecutar las acciones correspondientes.

3.9.1. Sistema automatizado de inyección propuesto

El sistema automatizado de inyección para fertirrigación para el presente proyecto se plantea como una alternativa a los convencionales antes mencionados. Su diseño integra componentes hidráulicos y electrónicos que permiten mejorar el seguimiento de las condiciones de operación del sistema de fertirrigación.

El desarrollo de este sistema automatizado de inyección busca implementar una solución adaptable a las necesidades de pequeñas unidades productivas, incorporando tecnologías de monitoreo y control que favorezcan una operación más eficiente del proceso de fertirrigación con bajo costo, pero cumpliendo los mismos monitoreo que un sistema de inyección de venta comercial.

4. METODOS Y PROCEDIMIENTOS

4.1. ANÁLISIS DE LOS PROCEDIMIENTOS TÉCNICOS PARA LA AUTOMATIZACIÓN DEL PROCESO DE FERTIRRIGACIÓN EN CULTIVOS DE ROSAS

En esta etapa iniciamos el proyecto se realizó un análisis técnico del proceso de fertirrigación empleado en el cultivo de rosas, con el propósito de identificar las variables operativas, los equipos presentes en la instalación y los requerimientos necesarios para la implementación de un sistema automatizado. Este análisis permitió establecer las condiciones de funcionamiento del sistema existente y determinar los elementos que intervienen en la preparación, transporte e inyección de soluciones nutritivas.

La realización de esta etapa resulta fundamental debido a que las necesidades de agua y nutrientes en los sistemas de fertirrigación dependan de diversos factores asociados al cultivo, las condiciones de operación y las características propias de la infraestructura utilizada. Por esta razón, antes de desarrollar una estrategia de automatización es necesario identificar las variables que influyen en el proceso y los componentes que requieren supervisión y control para optimizar el uso de los recursos hídricos y nutricionales [30].

En la Figura 1 se presenta el esquema de operación del sistema de fertirrigación utilizado en la finca antes de la implementación de la propuesta de automatización. Durante la inspección se observó que la solución se almacenaba en tanques independientes posteriormente incorporado a la tubería principal mediante la regulación manual de válvulas, también se evidencio que los

volúmenes de solución nutritiva presente en los tanques de almacenamiento, generaban variaciones en la cantidad suministrada al sistema de riego.

Esta condición dificultaba mantener una dosificación uniforme y un control continuo del proceso, incrementando la posibilidad de errores operativos y afectando la estabilidad del sistema de fertirrigación. El análisis se llevó a cabo mediante inspecciones de campo, observación directa de la infraestructura de riego y recopilación de información técnica relacionada con el proceso de fertirrigación utilizado en la finca. Durante esta etapa se identificaron los principales elementos hidráulicos involucrado en la operación del sistema, incluyendo tanques de almacenamiento, líneas de conducción, válvulas de control y equipos de bombeo [30].

4.1.1. Recopilación de información técnica y científica sobre fertirrigación.

Una vez identificadas las características operativas del sistema de fertirrigación existente, se realizó la recopilación de información técnica y científica relacionada con las tecnologías empleadas en el monitoreo y control de procesos de fertirrigación. Esta actividad tuvo como finalidad obtener fundamentos técnicos que permitieran establecer criterios para el diseño del sistema automatizado propuesto.

La recopilación de información se efectuó mediante la revisión de artículos científicos, documentación técnica de fabricantes, manuales especializados y publicaciones relacionadas con sistemas de fertirrigación, monitoreo de variables agrícolas y automatización de procesos. El análisis de esta fuente permitió identificar las principales tecnologías utilizadas para la adquisición de datos, supervisión de variables y gestión eficiente de recursos hídricos y nutricionales [31].

Durante esta etapa se estudió la importancia del monitoreo continuo de variables relacionadas con la calidad de la solución nutritiva y el comportamiento hidráulico del sistema. Asimismo, se analizaron diferentes arquitecturas de automatización empleadas en sistemas modernos de fertirrigación, donde la integración de sensores controladores y sistemas de comunicación permite mejorar la precisión en la aplicación de agua y nutrientes. Diversos estudios destacan que la incorporación de tecnologías de monitoreo en tiempo real facilita la toma de decisiones y contribuye a optimizar la eficiencia de los sistemas agrícolas automatizados.

La recopilación sirvió como base para definir las variables de interés seleccionar los dispositivos de instrumentación y establecer los criterios técnicos necesarios para el desarrollo del sistema de monitoreo y control implementando en el presente proyecto [31].

4.1.2. Análisis de los parámetros de pH

Como parte del proceso de recopilación de información técnica y caracterización de las condiciones iniciales del cultivo, se realizó el análisis de pH del agua de riego y del suelo empleando en la producción de rosas. La evaluación de este parámetro permitió establecer una referencia inicial para el desarrollo de la estrategia de monitoreo implementada posteriormente en el sistema automatizado de fertirrigación.

El pH constituye a una de las variables dentro de los procesos de fertirrigación debido a su influencia sobre la disponibilidad de nutrientes y la eficiencia de absorción por parte de las plantas. Variaciones significativas en este parámetro pueden afectar la solución de los fertilizantes y modificar las condiciones químicas de la solución nutritiva utilizada durante el riego.

Con el propósito de determinar las condiciones de operación existentes se realizó análisis fisicoquímicos del agua y suelo utilizado en el cultivo. Los ensayos fueron efectuados por el laboratorio AGROPROYEKT S.A. mediante procedimientos normalizados para caracterización de muestras agrícolas [32].

Tabla 12. Resultados del análisis de pH del agua de riego utilizada en el sistema de fertirrigación.

INFORMACIÓN DE LAS MUESTRAS	
Información Adicional	Jessy Margarita Landeta Conlago
Tipo de Muestra	Agua de Riego
Número de Muestra	#1
Información Proporcionada por el Cliente	Muestra Agua
CONTENIDO DE MACRO- Y MICROELEMENTOS EN mg/L (EQUIVALENTE A ppm)	
Análisis	pH
Unidad	-
Método de Referencia	EPA 9045 D

Recomendación: Agua de Riego para Cultivos Florícolas Intensivos	5,4 – 8,8
Resultado	6,9

Fuente: [32].

Los resultados obtenidos en el análisis de agua de riego reportaron un valor de pH de 6,9, indicando condiciones aceptadas a la neutralidad. Este resultado permitió establecer una referencia inicial sobre la calidad del agua empleada en el proceso de fertirrigación y sirvió como criterio para la selección de los dispositivos de monitoreo que se utilizaran en el sistema [32].

Tabla 13. Resultados del análisis de pH del suelo empleado en el cultivo de rosas.

INFORMACIÓN DE LAS MUESTRAS					
Información	Jessy Margarita Landeta Conlago			Cultivo:	Rosas
Adicional:					
Número de Muestra:	#1	Tipo de Muestra:	Suelo	Información Proporcionada por el Cliente:	Muestra Suelo
CONTENIDO DE MACRO Y MICROELEMENTOS EN ppm (RESPECTIVAMENTE EN mg/L) EN LA SOLUCIÓN DEL EXTRACTO VOLUMEN 1:2 (EXTRACTO AGUA)					
Análisis	Unidad	Método de Referencia	Niveles recomendados de Holanda para Rosas - Grupo 6	Resultado	
			Min. - Ópt. - Máx.		
Materia Orgánica	%	AOAC 967.05	4 - 8	4,6	
Textura	-	-	Ópt.: "franca arenosa" hasta "franca limosa"	franca	
Fracción de Partículas	%	ISO 11277	-	Arena: 42%; Limo: 42%; Arcilla: 16%	
% de Saturación de Bases	%	EPA 9081	> 65	93% (Clasificación: muy rico en bases)	

Distribución de Bases en el % de Saturación	%	EPA 9081	-	Ca: 66%, Mg: 20%, K: 6%, Na: 1%
Capacidad de Intercambio Catiónico (CIC)	meq/100 g	EPA 9081	> 15	13,4
Acidez Intercambiable	meq/100 g	ISO 14254	< 0,5	0,25
Aluminio Intercambiable	meq/100 g	ISO 14255	< 0,3	< 0,05
pH (en H₂O)	-	EPA 9045 D	6,2	6,9

Fuente: [33].

Se manera similar, el análisis realizado al suelo presento un valor de pH de 6,9 evidenciado condiciones favorables para el desarrollo del cultivo y proporcionando una información relevante sobre el entorno donde se aplicará la solución nutritiva [33].

Tabla 14. Valores de pH obtenidos en los análisis de laboratorio.

Muestra	pH
Agua de riego	6,9
Suelo	6,9

La comparación del resultado obtenidos permitió establecer una línea base de referencia para las condiciones iniciales del sistema. Asimismo, se identificó la necesidad de monitorear continuamente esta variable durante el proceso de fertirrigación, considerando que la incorporación de fertilizante puede generar modificaciones en el comportamiento químico de la solución nutritiva.

Con base al resultado obtenido y en la revisión de información técnica relacionada con sistemas de fertirrigación, el pH no fue definido como una de las variables de supervisión dentro de la arquitectura de automatización propuesta, Esta decisión permitió establecer los requerimientos técnicos para la selección de sensores y dispositivos de adquisición de datos destinados al monitoreo del proceso.

4.1.3. Análisis de los parámetros de CE

Considerando la importancia de la conductividad eléctrica como indicador de la concentración de sales y nutrientes presentes en el sistema de fertirrigación, se determinó la necesidad de incorporar esta variable dentro de la arquitectura de monitoreo propuesta. La supervisión continua de la CE permitirá disponer de información en tiempo real sobre las condiciones de la solución nutritiva durante el proceso de inyección de fertilizantes.

Los valores de conductividad eléctrica (CE) obtenidos mediante los análisis de laboratorio constituyeron la referencia principal para la selección del sensor de medición y para la definición de los criterios de monitoreo implementados en el sistema de automatización. Debido a que la CE representa la variable más importante para el control de la concentración de nutrientes en la solución nutritiva, su seguimiento continuo permitió establecer una línea base para evaluar el desempeño del sistema durante las pruebas de funcionamiento y la validación del proceso de fertirrigación propuesto.

Tabla 15. Resultados del análisis de Conductividad eléctrica del agua de riego utilizada en el sistema de fertirrigación.

INFORMACIÓN DE LAS MUESTRAS				
Información Adicional:	Jessy Margarita Landeta Conlago			
Tipo de Muestra:	Agua de Riego			
Número de Muestra:	#1			
Información	Muestra Agua			
Proporcionada por el				
Cliente:				
CONTENIDO DE MACRO- Y MICROELEMENTOS EN mg/L (EQUIVALENTE A ppm)				
Análisis	Unidad	Método de Referencia	Recomendación: Agua de Riego para Cultivos Florícolas Intensivos	Resultado
pH	-	EPA 9045 D	5,4 – 8,8	6,9
Conductividad (CE)	mS/cm	SM 2510 B	< 1,0 (ideal: < 0,5)	0,19

Fuente: [32].

Los resultados obtenidos en el análisis de agua de riego reportaron una conductividad eléctrica de 0,19 mS/cm, valor que permitió establecer una referencia inicial sobre la concentración de sales presentes en el recurso hídrico empleado para el proceso de fertirrigación [32].

Tabla 16. Resultados del análisis de Conductividad eléctrica del suelo empleado en el cultivo de rosas.

INFORMACIÓN DE LAS MUESTRAS				
Información Adicional:	Jessy Margarita Landeta Conlago			
Tipo de Muestra:	Suelo			
Cultivo:	Rosas			
Número de Muestra:	#1			
Información Proporcionada por el Cliente:	Muestra Suelo			
CONTENIDO DE MACRO Y MICROELEMENTOS EN ppm (RESPECTIVAMENTE EN mg/L) EN LA SOLUCIÓN DEL EXTRACTO VOLUMEN 1:2 (EXTRACTO AGUA)				
Análisis	Unidad	Método de Referencia	Niveles recomendados de Holanda para Rosas – Grupo 6 Mín. – Ópt. – Máx.	Resultado
Materia Orgánica	%	AOAC 967.05	4 – 8	4,6
Textura	–	–	Ópt.: "franca arenosa" hasta "franca limosa"	franca
Fracción de Partículas	%	ISO 11277	–	Arena: 42%, Limo: 42%, Arcilla: 16%
% de Saturación de Bases	%	EPA 9081	> 65	93% (Clasificación: muy rico en bases)
Distribución de Bases en el % de Saturación	%	EPA 9081	–	Ca: 66%, Mg: 20%, K: 6%, Na: 1%
Capacidad de Intercambio Catiónico (CIC)	meq/100 g	EPA 9081	> 15	13,4
Acidez Intercambiable	meq/100 g	ISO 14254	< 0,5	0,25

Aluminio	meq/100	ISO 14255	< 0,3	< 0,05
Intercambiable	g			
pH (en H₂O)	–	EPA 9045 D	6,2	6,9
pH (en KCl)	–	–	–	6,6
Conductividad (CE)	mS/cm	SM 2510 B	1,1	0,70

Fuente: [33].

De manera complementaria, el análisis de suelo presento una conductividad eléctrica de 0,70 mS/cm, proporcionando información sobre el contenido de sales presentes en el cultivo y permitiendo caracterizar las condiciones iniciales del sistema productivo [33].

Tabla 17. Valores de Conductividad eléctrica obtenidos en los análisis de laboratorio.

Muestra	Conductividad Eléctrica (mS/cm)
Agua de riego	0,19
Suelo	0,70

Fuente: [33].

AL comparar los resultados obtenidos de la Tabla 17, se observó que la conductividad eléctrica del suelo (0,70mS/cm) fue superior a la registrada en el agua de riego (0,19 mS/cm), evidenciando una mayor concentración de sales presentes en el medio de cultivo. Esta información permitió establecer parámetros iniciales de referencia para el monitoreo de la solución nutritiva dentro del sistema automatizado así que se considero la variable de CE para monitorear en el sistema de fertirrigación.

4.1.4. Comparación de métodos manuales y automatizados de fertirrigación

Una vez analizadas las variables principales del proceso de fertirrigación se realizó una comparación entre el método de operación manual identificado durante la inspección inicial y las características asociadas a los sistemas automatizados empleados actualmente en aplicaciones agrícolas. Esta comparación permitió establecer las ventajas operativas que podrían obtenerse mediante la incorporación de tecnologías de monitoreo y control dentro del sistema propuesto.

En el sistema manual observado, las actividades relacionadas con la regulación de válvulas, control de caudales, preparación de soluciones nutritivas y supervisión de los niveles de los tanques dependía directamente de la intervención del operador. Esta condición generaba variaciones en la dosificación de fertilizantes y limitaba la disponibilidad de información continua sobre el comportamiento del proceso. En la Figura 1 presenta la configuración del sistema manual de fertirrigación utilizada como referencia para el desarrollo del sistema automatizado propuesto. El sistema está constituido por dos tanques de almacenamiento de soluciones nutritivas (Tanque A y Tanque B), desde los cuales los fertilizantes son conducidos de forma independiente hacia una tubería principal. Cada línea incorpora una válvula de regulación para el ajuste manual del caudal y una válvula de apertura que permite habilitar o interrumpir el suministro de la solución nutritiva.

Posteriormente, ambas líneas convergen en la tubería principal, donde una bomba centrífuga impulsa la mezcla hacia el sistema de riego. Antes de su distribución a las plantas, el fluido atraviesa un filtro de agua encargado de retener partículas e impurezas que puedan afectar el funcionamiento del sistema. En esta configuración, la dosificación de fertilizantes y el control del proceso dependen completamente de la intervención del operador, quien regula manualmente la apertura de las válvulas y el caudal suministrado desde cada tanque

Por lo contrario, los sistemas automatizados de fertirrigación integran sensores, controladores electrónicos y dispositivos de comunicación que permiten supervisar variables como pH, conductividad eléctrica y caudal en tiempo real. La información adquirida es procesada por sistemas de control que ejecutan acciones automáticas para mantener las condiciones de operación previamente definidas. Asimismo, estos sistemas permiten reducir la intervención humana y mejorar la precisión en la aplicación de agua y nutrientes [34].

Diversos estudios indican que la automatización de la fertirrigación permite optimizar la utilización de recursos hídricos y fertilizantes, mejorar la uniformidad en la dosificación y disponer de información continua para la toma de decisiones. Además, la integración de sensores y sistemas de monitoreo facilita la detección de variaciones en el proceso y contribuye a incrementar la eficiencia operativa del sistema agrícola. En la Figura 2 presenta la configuración del sistema automatizado de fertirrigación desarrollado para el presente proyecto. La arquitectura hidráulica está conformada por dos tanques de almacenamiento de soluciones nutritivas (Tanque A y Tanque B), desde los cuales los fertilizantes son conducidos de manera independiente hacia el sistema de tubería de inyección de fertilizante. Cada línea incorpora una

válvula de agua, una válvula universal de apertura y cierre, un rotámetro para la medición visual del caudal y una válvula check destinada a evitar el retorno de la solución nutritiva hacia los depósitos de almacenamiento. Las soluciones provenientes de ambos tanques convergen en una tubería de succión de fertilizante, donde son impulsadas por una bomba secundaria (Bomba N.º 2) hacia la tubería principal del sistema. El funcionamiento de esta bomba es regulado mediante un variador de frecuencia, permitiendo controlar la velocidad de impulsión de acuerdo con las condiciones de operación establecidas por el sistema de control.

Adicionalmente, se incorporó dos sensores de presión (PT-01; PT-02) instalado en la tubería principal y secundaria con el propósito de supervisar continuamente las condiciones hidráulicas durante el proceso de inyección de fertilizantes. Finalmente, la solución es impulsada por la bomba principal hacia la red de distribución del sistema de riego. Esta configuración integra elementos de regulación, monitoreo y control que permiten automatizar el proceso de dosificación, mejorar la estabilidad hidráulica y optimizar la aplicación de nutrientes en el cultivo. A partir de esta comparación se determinó que la incorporación de tecnologías de automatización representaba una alternativa adecuada para mejorar el control del proceso de fertirrigación utilizado en el cultivo de rosas, constituyendo la base para el desarrollo del sistema de monitoreo y supervisión propuesta en el presente proyecto [34].

Tabla 18. Comparación entre métodos manuales y automatizados de fertirrigación.

Característica	Método manual	Método automatizado
Supervisión de variables	Periódica	Continua
Control de dosificación	Manual	Automático
Registro de datos	Limitado	En tiempo real
Dependencia del operador	Alta	Reducida
Precisión del proceso	Variable	Mayor
Capacidad de monitoreo	Visual	Mediante sensores

Fuente: [34].

4.1.5. Determinación de los parámetros de control del sistema

Una vez analizadas las características fisicoquímicas del agua y suelo, así como la configuración hidráulica del sistema de fertirrigación, se procedió a determinar las variables que debería ser supervisadas durante la operación del sistema automatizado. La selección de

estos parámetros se realizó considerando su influencia sobre la dosificación de nutrientes y el funcionamiento general del proceso de fertirrigación.

La selección de los parámetros de control se fundamentó en la necesidad de supervisar tanto las condiciones químicas de la solución nutritiva como el comportamiento hidráulico del sistema de inyección. Los sistemas modernos de fertirrigación automatizada emplean sensores y dispositivos de monitoreo para adquirir información en tiempo real sobre variables críticas del proceso. Permitiendo optimizar la aplicación de agua, nutrientes y mejorar la precisión de la dosificación [34].

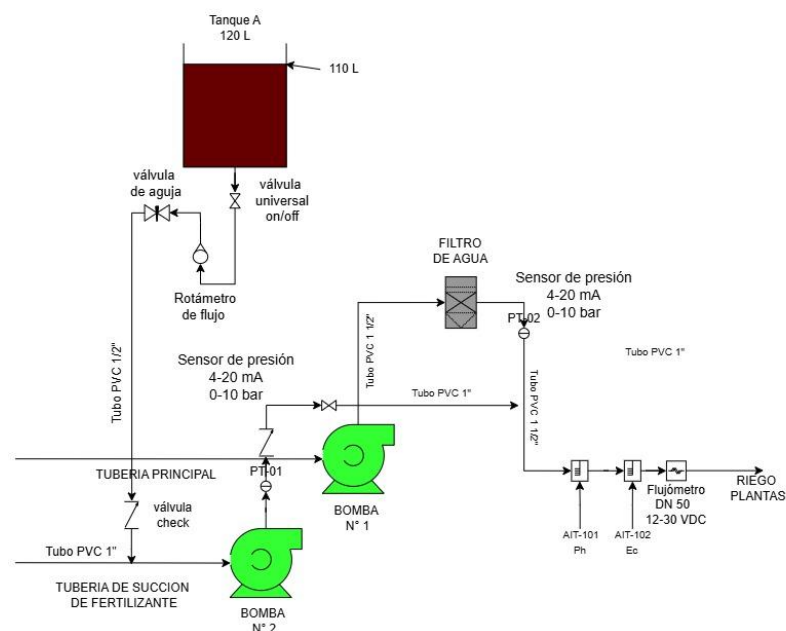


Figura 3. Sistema de inyección y monitoreo de caudal implementado en el sistema de inyección para fertirrigación.

La Figura 3 presenta la configuración hidráulica del sistema automatizado de inyección para fertirrigación implementado en el sistema. La arquitectura incorpora una bomba secundaria encargada de la succión de las soluciones nutritivas y una bomba principal responsable de impulsar la mezcla hacia el sistema de riego. Asimismo, integra un flujómetro ultrasónico DN50 para la medición del caudal, dos sensores de presión (PT-01 bomba de inyección) y (PT-02 bomba principal) para el monitoreo de las condiciones hidráulicas, un filtro de agua y elementos de regulación necesarios para controlar el suministro de fertilizantes durante la operación del sistema.

4.1.6. Frecuencia de la bomba N°2

Se consideró la frecuencia de operación de la bomba secundaria (B2) como una variable de control del sistema, debido a que su velocidad es regulada mediante un variador de frecuencia. La modificación de la frecuencia permite ajustar el caudal de inyección de las soluciones nutritivas hacia la tubería principal, contribuyendo a mantener la conductividad eléctrica (CE) en el valor de referencia establecido para el proceso de fertirrigación.

Estos parámetros permitieron establecer las variables necesarias para el diseño del sistema automatizado de fertirrigación, constituyendo la base para la selección de sensores, actuadores, dispositivos de adquisición de datos y estrategias de control implementadas durante las etapas posteriores del desarrollo del sistema. [34].

La interfaz visualiza los valores de CE, caudal, Frecuencia, Setpoint CE y ajustes de pi así como las variables de operación del sistema. Esta información constituye la base y las funciones de monitoreo y supervisión implementadas en la propuesta de automatización.

Tabla 19. Parámetros de control definidos para el sistema automatizado.

Parámetro	Tipo	Visualización HMI	Función
Frecuencia	Operación	Frecuencia (Hz)	Controlar la velocidad de la bomba mediante el variador de frecuencia.
Ajustes PI	Configuración	Parámetros PI	Configurar las ganancias proporcional (P) e integral (I) para regular la frecuencia del variador en función del error de la conductividad eléctrica (CE).
CE	Químico	CE	Supervisar concentración de nutrientes
Set CE	Configuración	Set CE	Definir referencia de operación
Caudal (Q)	Hidráulico	Q (m ³ /h)	Supervisar flujo de fertilizante

4.2. DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DEL SISTEMA AUTOMATIZADO DE INYECCIÓN PARA LA DOSIFICACIÓN DE NUTRIENTES

El sistema de inyección para fertirrigación constituye uno de los elementos principales dentro de los sistemas de aplicación de nutrientes, ya que integra los componentes hidráulicos encargados de almacenamiento, transporte, regulación e inyección de fertilizantes hacia la red de riego. Su diseño debe garantizar una distribución uniforme de la solución nutritiva y

proporcionar las condiciones necesarias para la incorporación de dispositivos de monitoreo y control que permitan supervisar el comportamiento del proceso de fertirrigación [35].

Una vez identificado los parámetros técnicos requeridos para la automatización del proceso de fertirrigación, se procedió al diseño y construcción del sistema automatizado de inyección encargado de realizar la dosificación de nutrientes hacia la línea principal de riego. El desarrollo de esta estructura tuvo como finalidad integrar los elementos hidráulicos necesarios para el transporte regulación e inyección de soluciones nutritivas, permitiendo además la incorporación de dispositivos de monitoreo y control para la automatización del sistema.

El diseño del sistema de inyección fue concebido para operar dentro de un sistema de fertirrigación aplicado al cultivo de rosas, donde la distribución uniforme de nutrientes constituye un factor determinante para el crecimiento y desarrollo adecuado de las plantas. Diversos sistemas de fertirrigación emplean configuraciones basadas en tanques de almacenamiento, sistemas de bombeo, válvulas y elementos de distribución con el propósito de garantizar un suministro homogéneo de agua y fertilizantes hacia el cultivo [35].

La configuración desarrollada permite almacenar soluciones nutritivas en depósitos independientes y conducir las hacia la línea principal mediante un sistema de inyección controlada. Esta disposición facilita la regulación del caudal suministrado el monitoreo de las condiciones de operación basadas en la variable agronómica como la conductividad eléctrica (CE).

Asimismo, el diseño fue planteado considerando criterios de funcionalidad, facilidad de mantenimiento y posibilidad de integración con dispositivos electrónicos de adquisición de datos, permitiendo disponer de una plataforma adecuada para la implementación de estrategias de monitoreo y supervisión en tiempo real. Esta característica constituye la base para la construcción del sistema automatizado propuesto y la posterior incorporación de sensores actuadores y elementos de control [35].

Tabla 20. Componentes principales considerados en el diseño del sistema automatizado de inyección para fertirrigación.

Componente	Función
Tanques de fertilización	Almacenamiento de soluciones nutritivas
Bomba centrífuga	Impulsión del flujo (agua)

Bomba centrífuga	Impulsión de solución nutritiva
Válvulas de regulación	Ajuste del caudal
Rotámetro	Medición del fertilizante inyectado
Flujómetro ultrasónico DN50	Supervisión del caudal principal
Sensor pH	Monitoreo químico
Sensor CE	Monitoreo químico
Sensor PT-01	Monitorear la presión de la línea principal de inyección del sistema.
Sensor PT-02	Monitorear la presión de la línea principal de impulsión del sistema.
M5 Tough	Supervisión y control

Fuente: [35].

4.2.1. Selección de componentes hidráulicos y eléctricos del sistema

Una vez definida la configuración general del sistema automatizado de inyección para fertirrigación, se procedió a la selección de los componentes hidráulicos y eléctricos necesarios para su implementación. Este proceso se realizó considerando los requerimientos operativos identificados durante el análisis del sistema, así como las condiciones de funcionamiento del cultivo de rosas y las características de los dispositivos de monitoreo y control incorporados en la propuesta.

La selección de los componentes estuvo orientada a garantizar el transporte adecuado de las soluciones nutritivas, la regulación del caudal de inyección, el monitoreo de las variables hidráulicas y fisicoquímicas del proceso, así como la adquisición de información en tiempo real para la ejecución de la estrategia de control implementada. Para ello se consideraron elementos hidráulicos destinados al almacenamiento, conducción y regulación del flujo, además de dispositivos eléctricos y electrónicos encargados del monitoreo, procesamiento, supervisión y control del sistema de fertirrigación [36].

Tabla 21. Clasificación de los componentes seleccionados para el sistema.

Categoría	Componentes
Hidráulicos	Tanques de fertilización A y B, bomba principal, bomba secundaria de succión, válvulas de regulación, válvulas check,, filtro de agua, rotámetro, flujómetro ultrasónico DN50, sensor de presión de la bomba principal y sensor de presión de la bomba secundaria.
Eléctricos y electrónicos	Variador de frecuencia RIONO R600, M5Stack Tough, sensores RS485 de pH y conductividad eléctrica (CE), fuente de alimentación y dispositivos de protección y control.

Con base en estos criterios, los componentes seleccionados fueron agrupados en dos categorías principales; componentes hidráulicos y componentes eléctricos-electrónicos, permitiendo establecer una arquitectura funcional capaz de integrar las etapas de dosificación. Monitoreo y control del sistema automatizado de inyección propuesto.

Como parte del proceso de selección de componentes hidráulicos, se definieron los dispositivos encargados de regular, monitorear y controlar el suministro de fertilización hacia la línea principal de riego. La configuración adopta elementos destinados al ajuste del caudal, medición del flujo, supervisión de la presión e inyección controlada de fertilizantes, permitiendo verificar el funcionamiento del sistema durante su operación [36].

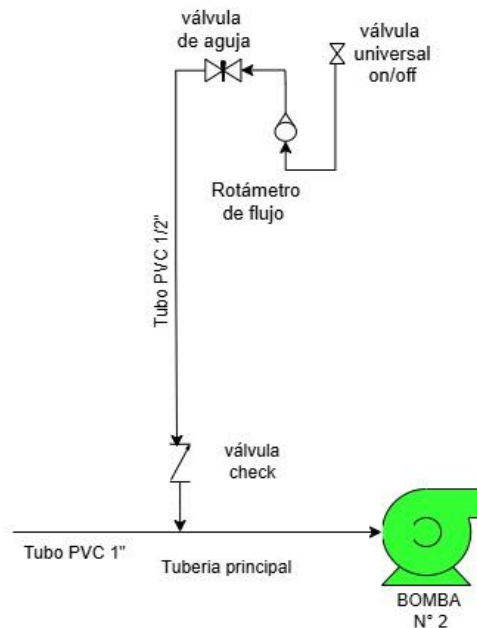


Figura 4. Línea de inyección equipada con dispositivos de control y monitoreo de flujo.

La Figura 4 presenta la configuración de una de las líneas de inyección de fertilizantes implementadas en el sistema automatizado de fertirrigación. La línea está compuesta por una válvula de aguja utilizada para regular el suministro de la solución nutritiva, una válvula universal de apertura y cierre que permite aislar la línea durante las labores de operación o mantenimiento, y un rotámetro encargado de proporcionar una medición visual del caudal de fertilizante suministrado para la succión óptima de los tanques A y B.

Posteriormente, la solución nutritiva atraviesa una válvula check, cuya función es impedir el retorno del fluido hacia el tanque de almacenamiento, garantizando el flujo unidireccional dentro del sistema. Finalmente, la solución es conducida hacia la tubería principal de succión, desde donde es impulsada por la bomba secundaria (Bomba N.º 2) para su incorporación al proceso de fertirrigación. Esta configuración permite regular manualmente el caudal de cada línea y supervisar el flujo suministrado antes de su ingreso al sistema de inyección [36].

La integración de estos elementos permitió conformar un sistema automatizado de inyección capaz de realizar el transporte, dosificación y monitoreo de las soluciones nutritivas, proporcionando la infraestructura necesaria para la implementación de control desarrollado en el presente proyecto.

4.2.2. Diseño del sistema hidráulico de inyección

Una vez seleccionados los componentes hidráulicos y eléctricos necesarios para la implementación del sistema, se procedió al diseño del sistema hidráulico de inyección encargado de transportar y dosificar las soluciones nutritivas hacia la línea principal de riego. Esta etapa tuvo como propósito definir la distribución de los elementos que intervienen en la conducción, regulación y monitoreo del fertilizante, garantizando condiciones adecuadas de operación y una distribución uniforme de los nutrientes dentro del proceso de fertirrigación como se identifica en la Figura 2 [37].

Tabla 22. Función de los elementos hidráulicos incorporados en el sistema de inyección.

Elemento	Función
Tanques de fertilización A y B	Almacenamiento de las soluciones nutritivas.
Válvulas de aguja	Ajuste manual del caudal de inyección.
Rotámetros de área variable	Supervisión visual del caudal suministrado.
Válvulas check	Prevención del retorno de la solución nutritiva.

Bomba secundaria	Succión de las soluciones nutritivas desde los tanques de almacenamiento.
Variador de frecuencia	Regulación de la velocidad de la bomba secundaria
Bomba principal	Impulsión de la mezcla hacia la tubería principal de riego.
Sensores de presión PT-01 y PT-02	Monitoreo de la presión en el sistema hidráulico.
Sensores de pH y CE	Supervisión de las variables fisicoquímicas de la solución nutritiva.
Flujómetro ultrasónico DN50	Medición del caudal total suministrado al sistema de riego

Para controlar la velocidad de operación de esta bomba se implementó un variador de frecuencia permitiendo el caudal de fertilizante suministrado al sistema de acuerdo con los requerimientos establecidos por la estrategia de control desarrollada [37].

Posteriormente, la mezcla es impulsada por la bomba principal hacia la tubería principal del sistema de riego. Con el propósito de supervisar el comportamiento hidráulico durante el funcionamiento del sistema automatizado de inyección, se instalaron dos sensores de presión: el sensor PT-01, ubicado en la bomba secundaria para monitorear la presión durante la etapa de inyección, y el sensor PT-02, localizado a la salida de la bomba principal para medir la presión de impulsión hacia la red de distribución.

Finalmente, sobre la tubería principal se ubicaron el flujómetro ultrasónico DN 50 y los sensores de pH y conductividad eléctrica (CE) permitiendo la adquisición en tiempo real de las principales variables hidráulicas y fisicoquímicas del proceso de fertirrigación [37].

4.2.3. Diseño del sistema eléctrico y electrónico

Tras establecer el diseño hidráulico del sistema de inyección, se procedió al desarrollo de la arquitectura eléctrica y electrónica como se puede apreciar en ANEXOS Figura 31 y 32 encargada de integrar los dispositivos de monitoreo, adquisición de datos, procesamientos de información y accionamiento de los elementos instalados en el sistema de inyección automatizados de fertirrigación. Esta etapa como finalidad establecer una estructura de comunicación y control que permitiera supervisar continuamente las variables del proceso y ejecutar las acciones correspondientes sobre los dispositivos de actuación.

La arquitectura implementada fue desarrollada considerando la interacción entre los sensores, actuadores, dispositivos de comunicación y la unidad central de procesamiento. Para ello se usó

la entrada RS485 que tiene integrado el tough como unidad principal de adquisición y procesamiento de datos, encargado de recibir la información proveniente de los sensores y ejecutar la lógica de control desarrollada para el sistema, configura parámetros del sistema y facilitar la interacción con el operador mediante una pantalla táctil [38].

Por otra parte, los sensores de presión fueron adquiridos mediante la interfaz I2C incorporada en el M5Stack Tough, proporcionando mediciones continuas de la presión del sistema. La integración de ambas interfaces de comunicación permitió centralizar el monitoreo de las principales variables del proceso de fertirrigación, suministrando la información necesaria para el sistema de supervisión y control [39].

Como parte del sistema de accionamiento, se incorporó un variador de frecuencia RIONO 600, destinado a controlar la velocidad de la bomba secundaria encargada de la succión de las soluciones nutritivas desde los tanques de fertilización encargado de regular el paso de fertilizantes hacia la línea principal de inyección [25].

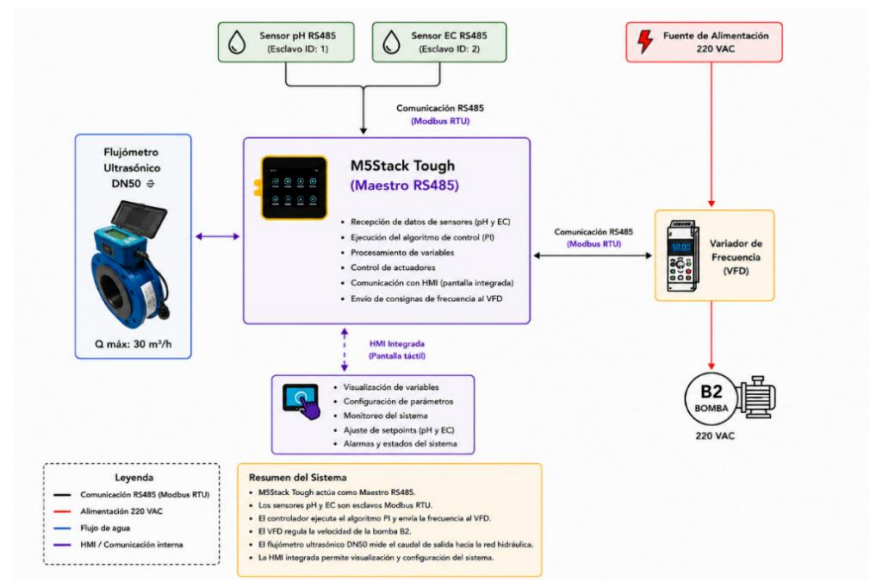


Figura 5. Arquitectura eléctrica y electrónica del sistema automatizado de fertirrigación.

La Figura 5 presenta el esquemático electrónico desarrollado para la integración de los dispositivos de monitoreo y control implementados en el sistema automatizado de fertirrigación. Una vez definida la arquitectura eléctrica y electrónica del sistema, se procedió a establecer las interconexiones entre los dispositivos de monitoreo, control y accionamiento, permitiendo la implementación física del sistema automatizado de fertirrigación.

4.2.3.1. Diseño del circuito electrónico de control

Con el propósito de integrar los dispositivos electrónicos del sistema automatizado de fertirrigación, se diseñó un circuito electrónico ANEXOS Figura 32 de control basado en una red de comunicación Modbus RTU, cuya arquitectura permite la adquisición de datos, el procesamiento de la información y el control de los dispositivos del sistema desde un único controlador. En esta arquitectura, el M5Stack Tough actúa como controlador maestro (Master), siendo el encargado de ejecutar la lógica de control, gestionar la comunicación con los dispositivos de campo y supervisar el funcionamiento general del proceso [40].

El M5Stack Tough incorpora una pantalla táctil que funciona como interfaz hombre-máquina (HMI), permitiendo visualizar en tiempo real las variables del sistema, como la conductividad eléctrica (CE), el caudal, la frecuencia, Ajustes PI para la operación de la bomba, además de configurar los parámetros necesarios para el funcionamiento del sistema de fertirrigación.

Durante la operación del sistema, el M5Stack Tough consulta periódicamente las variables medidas por los sensores mediante la red Modbus RTU, procesa la información recibida y ejecuta la lógica de control PI. A partir del error entre la conductividad eléctrica medida y la consigna, calcula la frecuencia de referencia y la envía al variador RIONO R600 para regular la velocidad de la bomba secundaria de inyección. De esta manera, el M5Stack Tough coordina la adquisición, supervisión y control del sistema automatizado. [40]

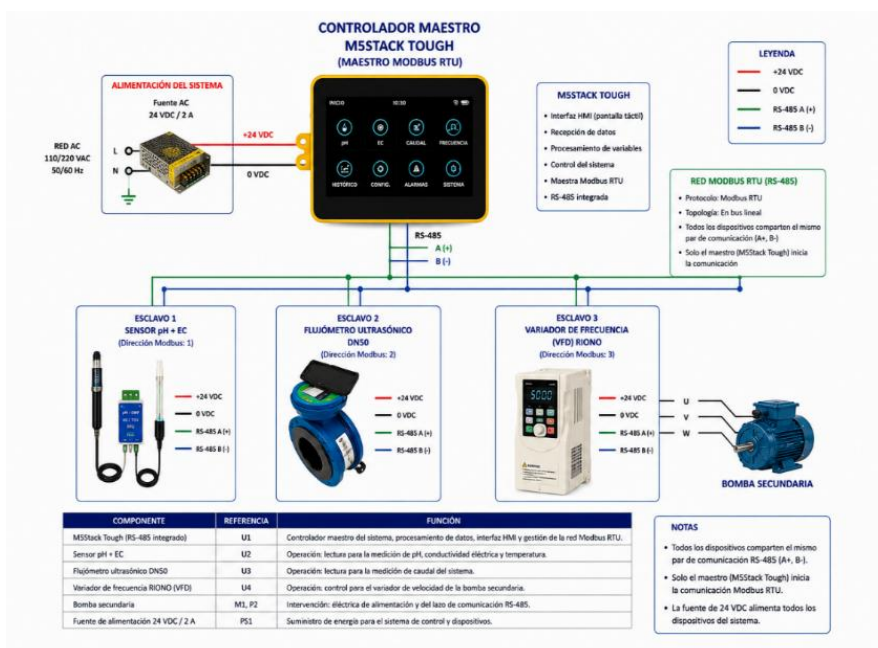


Figura 6. Esquemático electrónico del circuito de control implementado.

La Figura 6 presenta el esquemático electrónico desarrollado para la integración de los dispositivos de monitoreo y control del sistema automatizado de fertirrigación. En el diagrama se observa al M5Stack Tough como unidad central de procesamiento y controlador maestro de la red Modbus RTU, encargado de gestionar el intercambio de información con los dispositivos esclavos mediante la interfaz. Asimismo, se muestra la integración del variador de frecuencia RIONO R600, el sensor de pH, el sensor de conductividad eléctrica (CE) y el flujómetro ultrasónico, todos interconectados a través de un único bus de comunicación RS-485, conformando la red industrial del sistema de monitoreo y control.

La implementación de esta arquitectura maestro-esclavo proporciona una solución robusta, escalable y de fácil integración, permitiendo incorporar nuevos dispositivos compatibles con Modbus RTU sin modificar la estructura general de la red, además de simplificar el mantenimiento y mejorar la confiabilidad de las comunicaciones industriales.

Tabla 23. Componentes del sistema electrónico.

Componente	Referencia	Función
M5Stack Tough con RS-485 integrado	U1	Controlador maestro, procesamiento, interfaz HMI y gestión de la red Modbus RTU.
Sensor combinado pH y CE	U2	Dispositivo esclavo para medir pH, conductividad eléctrica y temperatura.
Flujómetro ultrasónico	U3	Dispositivo esclavo para medir el caudal.
Variador de frecuencia R600	U4	Dispositivo esclavo para regular la velocidad de la bomba.
Borneras y conectores	H1, H2	Interconexión de alimentación y del bus RS-485.

4.2.4. Desarrollo de la interfaz gráfica de supervisión y configuración

Dentro de la arquitectura propuesta para la automatización del proceso de fertirrigación, se consideró necesario incorporar un mecanismo que permitiera acceder de forma directa a la información generada por los sensores instalados en el sistema. Debido a ello, se desarrolló una interfaz gráfica de supervisión capaz de concentrar en una única pantalla las variables de operación más relevantes, facilitando el seguimiento del proceso por parte del operador.

La interfaz fue implementada sobre el dispositivo M5 Tough mediante las librerías arduino, aprovechando las capacidades de visualización y control proporcionadas por la pantalla táctil integrada. Esta herramienta permitió presentar en tiempo real los valores registrados por los

sensores de pH, CE y caudal, proporcionando información inmediata sobre el estado de funcionamiento del sistema de fertirrigación [41].

A diferencia de los métodos convencionales de supervisión, donde la información suele encontrarse distribuida entre distintos dispositivos o instrumentos de medición, la propuesta desarrollada centraliza la visualización de datos en un único entorno de operación. Esta característica simplifica las tareas de monitoreo y facilita la interpretación de las condiciones presentes en el proceso durante la dosificación de nutrientes.

Además de la supervisión de variables, la interfaz incorpora opciones destinadas a la configuración de parámetros de funcionamiento. Mediante estas funciones es posible establecer valores de referencia para la variable de monitoreo y acceder a diferentes opciones de ajuste requeridas durante la operación del sistema. De esta manera, el operador dispone de una herramienta que combina supervisión y configuración dentro de una misma plataforma de trabajo [41].

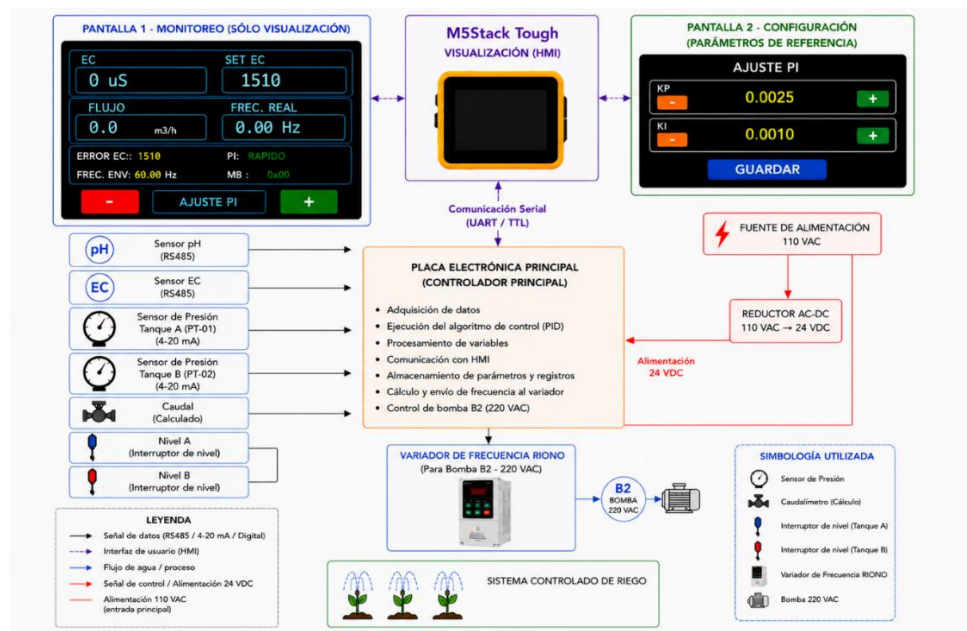


Figura 7. Arquitectura de la interfaz gráfica de supervisión y configuración implementada en el sistema automatizado de fertirrigación.

La Figura 7 presenta la arquitectura general del sistema de monitoreo, supervisión y control implementado para el proceso automatizado de fertirrigación. La estructura integra los dispositivos de adquisición de datos, procesamiento, visualización y accionamiento,

permitiendo supervisar y controlar en tiempo real las variables hidráulicas y fisicoquímicas del sistema.

La interfaz de supervisión fue desarrollada sobre un M5Stack Tough, el cual se comunica con la placa principal mediante comunicación serial (RS485). La interfaz dispone de una pantalla de monitoreo para la visualización en tiempo real de la variable de operación y una pantalla de configuración que permite establecer los valores de referencia (Set Point) de conductividad eléctrica utilizados por el sistema de control.

Como elemento de actuación, la placa electrónica calcula la frecuencia de operación requerida y envía la señal de control al variador de frecuencia RIONO, encargado de regular la velocidad de la bomba secundaria (B2) utilizada para la inyección de las soluciones nutritivas hacia el sistema de riego. La alimentación eléctrica del sistema se obtiene a partir de una fuente de 110 VAC, la cual es convertida a 24 VDC mediante un convertidor AC-DC para suministrar energía a los dispositivos electrónicos y sensores.

La organización de los elementos gráficos fue planteada con criterios de simplicidad visual y acceso rápido a la información. Para ello se emplearon indicadores numéricos, etiquetas descriptivas y botones de navegación que permiten consulta las variables principales sin necesidad de acceder a menús complejos. Este enfoque contribuye a mejorar las interacciones entre el usuario y el sistema automatizado, favoreciendo una supervisión más eficiente durante las actividades de operación y pruebas [41].

4.3. DESARROLLO E IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA DE CONTROL AUTOMATIZADO

Una vez completada las estepas de diseño hidráulico, eléctrico y de supervisión, se procedió al desarrollo del sistema encargado de coordinar las funciones de monitoreo y control dentro del proceso de fertirrigación. Esta fase tuvo como objetivo integrar los diferentes elementos seleccionados previamente en una única plataforma capaz de adquirir información de campo, procesar las variables medidas y ejecutar acciones sobre los dispositivos de dosificación instalados en el sistema.

La implementación del sistema de control se fundamentó en una arquitectura orientada a la automatización de proceso agrícola, donde la adquisición de datos y la actuación sobre los elementos de control se realizan de manera coordinada. Bajo este enfoque, las variables relacionadas con la calidad de la solución nutritiva y el caudal de inyección son supervisadas

continuamente para proporcionar información actualizada sobre las condiciones de operación del sistema. Esta estrategia permite centralizar el monitoreo, mejorar la gestión de los recursos utilizados y facilitar la toma de decisiones durante la aplicación de nutrientes [42].

Para la implementación se estableció una estructura compuesta por sensores de medición, dispositivos de adquisición de datos, elementos de control y una interfaz de supervisión desarrollada para el operador. La integración de estos componentes permitió establecer un flujo continuo de información entre el proceso físico y el controlador principal, favoreciendo la operación coordinada de los diferentes subsistemas que conforman la arquitectura de automatización propuesta.

A diferencia de un sistema convencional de fertirrigación, donde gran parte de las actividades de monitoreo y regulación depende de la intervención directa del operador, la solución desarrollada incorpora mecanismos de supervisión y procesamiento que permiten gestionar las variables de operación desde una plataforma centralizada. Esta característica facilita la incorporación de estrategias de control y mejora la capacidad de seguimiento del proceso durante las etapas de funcionamiento y evaluación [42].

4.3.1. Selección de instrumentación y control

Como parte del desarrollo del sistema de control automatizado, se realizó la selección de los dispositivos encargados de la adquisición, procesamiento y supervisión de las variables involucradas en el proceso de fertirrigación. Esta selección se efectuó considerando aspectos como la capacidad de procesamiento, disponibilidad de interfaces de comunicación, compatibilidad entre dispositivos, facilidad de integración y confiabilidad para aplicaciones de automatización agrícola.

Para la adquisición, procesamiento y supervisión de la información se seleccionó un M5Stack Tough, debido a su capacidad para integrar múltiples interfaces de comunicación, su pantalla táctil incorporada y su compatibilidad con dispositivos utilizados en sistemas de automatización industrial. Este equipo constituye la unidad maestra del sistema, encargada de recibir las señales provenientes de los dispositivos de medición, ejecutar el algoritmo de control, gestionar la comunicación con los equipos de campo y coordinar el accionamiento del variador de frecuencia mediante la red Modbus RTU [43].

La comunicación entre los dispositivos de campo se implementó mediante una red Modbus RTU sobre RS485, utilizando la interfaz RS485 integrada en el M5Stack Tough. A través de

esta red se realizó el intercambio de información con los sensores de potencial de hidrógeno (pH), conductividad eléctrica (CE), el flujómetro y el variador de frecuencia, permitiendo el monitoreo y control de las variables principales del proceso de fertirrigación.

Para el monitoreo de las variables hidráulicas se incorporaron dos sensores de presión conectados mediante la interfaz I2C del M5Stack Tough, los cuales permitieron supervisar las condiciones de presión en las etapas de succión e impulsión del sistema. La integración de las interfaces RS485 e I2C en un único controlador facilitó la centralización de la adquisición de datos, el procesamiento de la información y la supervisión en tiempo real del sistema automatizado de fertirrigación. [43].

Tabla 24. Dispositivos de adquisición y control implementados en el sistema.

Dispositivo	Función
M5Stack Tough	Unidad maestra del sistema encargada de la adquisición y procesamiento de datos, ejecución del algoritmo de control PI, supervisión, configuración y comunicación con los dispositivos mediante RS485 Modbus RTU e I2C.
Sensor de pH RS485	Medición del potencial de hidrógeno (pH) de la solución nutritiva mediante comunicación Modbus RTU.
Sensor de conductividad eléctrica (CE) RS485	Medición de la conductividad eléctrica de la solución nutritiva para el monitoreo y control del proceso mediante comunicación Modbus RTU.
Sensor de presión PT-01 (I2C)	Monitoreo de la presión en la línea de succión del sistema.
Sensor de presión PT-02 (I2C)	Monitoreo de la presión en la línea de impulsión del sistema.
Caudalímetro RS485	Medición del caudal suministrado al sistema de fertirrigación mediante comunicación Modbus RTU.
Variador de frecuencia RIONO R600 RS485	Regulación de la velocidad de la bomba secundaria mediante comandos Modbus RTU para controlar la conductividad eléctrica (CE).

Una vez seleccionados e integrados los dispositivos de adquisición, monitoreo y actuación, se procedo al desarrollo del algoritmo de control encargado de coordinar el funcionamiento del sistema automatizado de fertirrigación, permitiendo la adquisición de datos en tiempo real y el control de los dispositivos hidráulico y eléctricos implementados.

4.3.2. Desarrollo del algoritmo de control para la inyección de fertilizantes

Una vez seleccionados e integrados los dispositivos de adquisición de datos y control, se desarrolló el algoritmo encargado de coordinar el funcionamiento del sistema automatizado de fertirrigación. La lógica implementada fue diseñada para realizar de forma continua la adquisición de las variables del proceso, procesar la información recibida y ejecutar las acciones necesarias sobre el sistema de control, permitiendo mantener una operación estable del sistema de inyección para fertirrigación. La estructura general del algoritmo se fundamentó en las etapas de adquisición de datos, comparación con los valores de referencia y aplicación de una estrategia de control en tiempo real, metodología ampliamente utilizada en sistemas automatizados de fertirrigación [44]

El algoritmo inicia con la inicialización del M5Stack Tough como unidad maestra del sistema, configurando las interfaces de comunicación RS485 Modbus RTU e I2C para la adquisición de información proveniente de los dispositivos de campo. A través de la red Modbus RTU se establece la comunicación con los sensores de pH, conductividad eléctrica (CE), Flujometro y el variador de frecuencia, mientras que mediante la interfaz I2C se realiza la adquisición de las mediciones correspondientes a los sensores de presión instalados en las líneas de succión e impulsión del sistema. Posteriormente, se ejecuta la lectura periódica de todas las variables del proceso, consolidando la información necesaria para supervisar el estado de operación del sistema de fertirrigación.

Una vez adquiridos los datos, el sistema ejecuta una etapa de procesamiento en la que verifica la validez de las mediciones y calcula el error entre la conductividad eléctrica (CE) medida y el valor de referencia (Set Point) establecido por el operador desde la interfaz gráfica del M5Stack Tough. Este procedimiento permite determinar si es necesario realizar ajustes en la velocidad de la bomba secundaria para mantener la concentración de nutrientes dentro del rango de operación establecido [44].

Posteriormente, el M5Stack Tough ejecuta el controlador PI a partir del error calculado entre la conductividad eléctrica (CE) medida y el valor de consigna. La salida del controlador corresponde a una referencia de frecuencia limitada al rango de operación configurado, la cual se transmite al variador RIONO R600 mediante Modbus RTU. El variador ajusta la frecuencia de alimentación de la bomba secundaria y, con ello, el caudal de inyección de la solución nutritiva. De manera simultánea, el M5Stack Tough actualiza las variables del proceso en su interfaz táctil para la supervisión del operador. [44]

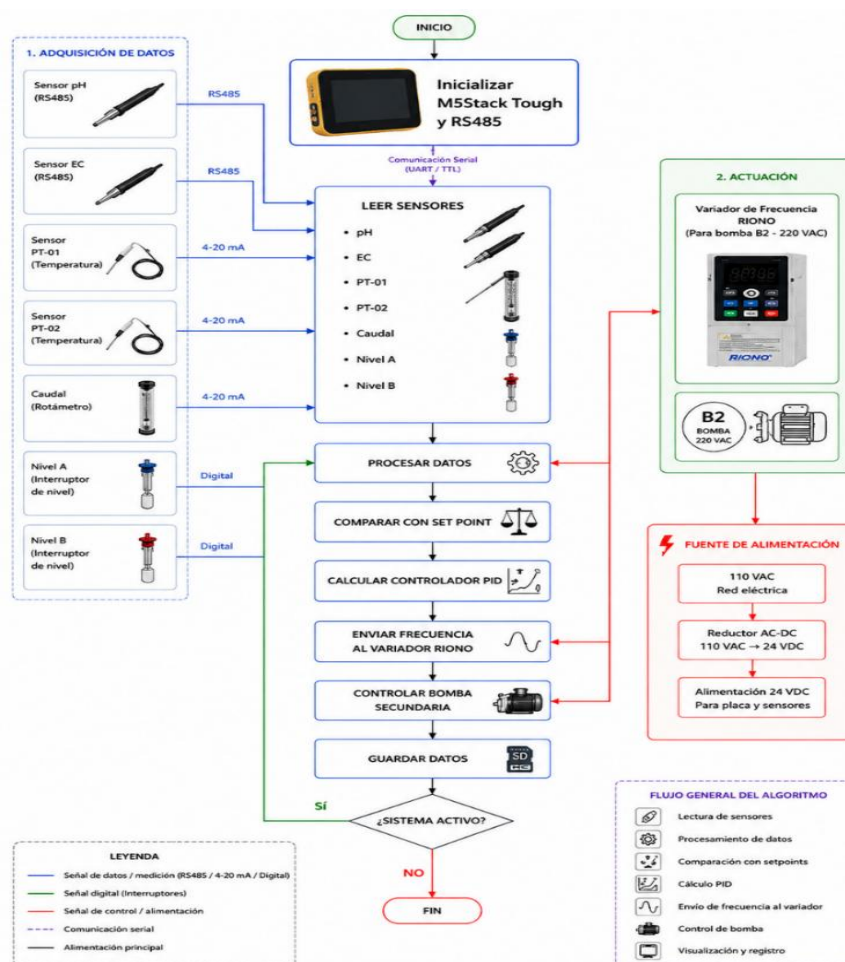


Figura 8. Diagrama de flujo del algoritmo de control implementado para el sistema automatizado de fertirrigación.

La Figura 8 presenta el diagrama de flujo del algoritmo de control desarrollado para el sistema automatizado de fertirrigación. El proceso inicia con la inicialización del M5Stack Tough como unidad maestra del sistema, configurando las interfaces de comunicación RS485 Modbus RTU e I2C, necesarias para la adquisición de datos provenientes de los dispositivos de medición instalados en el sistema.

Posteriormente, el algoritmo realiza la lectura de las variables correspondientes al potencial de hidrógeno (pH), conductividad eléctrica (CE), caudal y estado del variador de frecuencia mediante la red Modbus RTU, mientras que las mediciones de presión en las líneas de succión (PT-01) e impulsión (PT-02) son adquiridas a través de la interfaz I2C del M5Stack Tough. La información recopilada es procesada y comparada con el valor de referencia (Set Point) de la conductividad eléctrica (CE), definido por el operador desde la interfaz gráfica implementada en el M5Stack Tough [44].

Con base en el error obtenido entre la CE medida y el valor de consigna, el M5Stack Tough ejecuta el controlador PI y calcula la frecuencia de referencia requerida. Esta referencia se transmite al variador de frecuencia RIONO R600 mediante Modbus RTU, y el variador regula la velocidad de la bomba secundaria. La variación de frecuencia modifica el caudal de inyección de la solución nutritiva de acuerdo con la acción de control.

Finalmente, el estado de todas las variables del proceso es actualizado en tiempo real en la interfaz táctil del M5Stack Tough, permitiendo la supervisión y configuración del sistema por parte del operador. Mientras el sistema permanezca en funcionamiento, el algoritmo ejecuta continuamente el ciclo de adquisición, procesamiento, supervisión y control, garantizando el monitoreo permanente de las variables hidráulicas y fisicoquímicas involucradas en el proceso automatizado de fertirrigación. [44].

Tabla 25. Variables procesadas por el algoritmo de control.

Variable	Símbolo	Unidad	Dispositivo de adquisición	Función dentro del algoritmo
Potencial de hidrógeno	pH	pH	Sensor pH RS485	Supervisar la acidez de la solución nutritiva.
Conductividad eléctrica	CE	mS/cm	Sensor CE RS485	Verificar la concentración de nutrientes durante la fertirrigación.
Presión de succión	PT-01	bar	Sensor de presión	Monitorear la presión en la bomba secundaria durante la succión de fertilizantes.
Presión de impulsión	PT-02	bar	Sensor de presión	Supervisar la presión generada por la bomba principal hacia la línea de riego.
Caudal del sistema	Q	L/min	Flujómetro ultrasónico DN50	Determinar el caudal total suministrado al sistema.
Frecuencia del variador	f	Hz	Variador RIONO R600	Regular la velocidad de la bomba secundaria.
Set Point de operación	SP	Configurable	M5Stack Tough	Valor de referencia utilizado por el algoritmo de control.

4.3.3. Implementación del sistema de monitoreo hidráulico

Con el propósito de supervisar continuamente el comportamiento hidráulico del sistema automatizado de fertirrigación, se implementó un sistema de monitoreo encargado de adquirir

las variables de presión y caudal presentes durante la operación del sistema de inyección. La información obtenida permitió disponer de datos en tiempo real para el algoritmo de control y el registro de las condiciones de funcionamiento del sistema. La adquisición continua de variables constituye un elemento fundamental en los sistemas automatizados de riego, ya que facilita la supervisión permanente del proceso y el apoyo en la toma de decisiones de control [45].

Para la medición de la presión hidráulica se instalaron dos sensores electrónicos de presión con salida analógica de 4–20 mA. El sensor PT-01 fue ubicado en la línea de descarga de la bomba secundaria, encargada de succionar las soluciones nutritivas provenientes de los tanques A y B hacia el sistema de inyección para fertirrigación. Esta ubicación permitió monitorear la presión generada durante la etapa de inyección de fertilizantes [45].

El sensor PT-02 fue instalado en la descarga de la bomba principal, permitiendo registrar la presión existente en la tubería principal de riego una vez incorporada la solución nutritiva al sistema. La utilización de ambos sensores permitió obtener información independiente sobre el comportamiento hidráulico de las dos etapas de bombeo implementadas dentro del sistema.

La medición del caudal se realizó mediante un flujómetro ultrasónico DN50, instalado sobre la tubería principal del sistema de riego. Este dispositivo permitió registrar el caudal total impulsado hacia el cultivo sin generar pérdidas de carga adicionales, proporcionando una medición continua del flujo durante la operación del sistema.

Tabla 26. Variables hidráulicas monitoreadas durante la adquisición de datos.

Variable	Sensor	Ubicación	Tipo de señal	Unidad
Presión de inyección	PT-01	Descarga de la bomba secundaria	4–20 mA	Bar
Presión de impulsión	PT-02	Descarga de la bomba principal	4–20 mA	Bar
Caudal de riego	Flujómetro ultrasónico DN50	Tubería principal	Comunicación digital	L/min

Las señales provenientes de los sensores de presión fueron adquiridas mediante la interfaz I2C integrada en el M5Stack Tough, permitiendo la lectura directa de las mediciones de presión correspondientes a las líneas de succión e impulsión del sistema. De manera complementaria, las variables de pH, conductividad eléctrica (CE), caudal y el estado del variador de frecuencia

fueron obtenidas a través de la red de comunicación RS485 Modbus RTU. Posteriormente, toda la información fue procesada por el M5Stack Tough, visualizada en tiempo real mediante su pantalla táctil y almacenada para su posterior análisis experimental [45].

La adquisición de las variables hidráulicas y fisicoquímicas se ejecutó de forma periódica dentro del ciclo principal del algoritmo de control, garantizando la actualización continua de la información utilizada para la supervisión del proceso y el cálculo de las acciones de control implementadas en el sistema automatizado. La integración de las interfaces RS485 Modbus RTU e I2C en el M5Stack Tough permitió centralizar la adquisición, procesamiento y visualización de las variables del proceso, proporcionando una arquitectura de monitoreo robusta para aplicaciones de fertirrigación automatizada [45].

Tabla 27. Configuración del sistema de adquisición hidráulica.

Parámetro		Configuración
Número de sensores de presión		2
Número de flujómetros		1
Variables monitoreadas	Presión de inyección, presión de impulsión y caudal	
Unidad de supervisión	M5Stack Tough	
Frecuencia de adquisición	Definida por el ciclo principal del algoritmo de control	
Almacenamiento de datos	Memoria SD del M5Stack Tough	

4.3.4. Dimensionamiento y cálculos de operación del sistema

Una vez implementado el sistema de monitoreo hidráulico, se procedió al dimensionamiento de los principales parámetros de operación del sistema automatizado de inyección para fertirrigación. Esta etapa tuvo como finalidad verificar que los componentes hidráulicos seleccionados fueran capaces de satisfacer las condiciones de caudal, presión y dosificación requeridas para el transporte e inyección de las soluciones nutritivas hacia la línea principal de riego.

El dimensionamiento consideró el análisis del caudal de operación, la capacidad hidráulica de la bomba secundaria, las pérdidas de carga del sistema y las condiciones necesarias para garantizar una inyección uniforme de fertilizantes. Estos parámetros constituyen la base para el funcionamiento estable del sistema y para la correcta implementación del algoritmo de control

desarrollado en el presente trabajo. El procedimiento seguido se fundamentó en criterios de diseño hidráulico para sistemas de riego y fertirrigación descritos por Waller y Yitayew [46].

Tabla 28. Parámetros considerados para el dimensionamiento hidráulico.

Parámetro	Símbolo	Unidad
Caudal de operación	Q	L/min
Presión de descarga	P	bar
Altura manométrica	H	m
Velocidad del fluido	V	m/s
Diámetro interno de tubería	D	mm
Potencia de la bomba	Pb	HP
Frecuencia del variador	F	Hz
Caudal de inyección	Qi	L/min

4.3.4.1. Cálculo del caudal de operación

El caudal constituye una de las variables hidráulicas más importantes dentro del sistema de fertirrigación, debido a que determina la cantidad de solución nutritiva transportada hacia la línea principal de riego durante un intervalo de tiempo. Para su determinación se utilizó el rotámetro instalado en la línea de impulsión de la bomba secundaria, permitiendo conocer el flujo instantáneo del fertilizante suministrado.

La determinación del caudal permitió establecer el punto de operación del sistema y verificar que la capacidad de impulsión de la bomba fuera suficiente para satisfacer los requerimientos del proceso de inyección [46].

La relación utilizada fue:

$$Q = \frac{V}{t} \quad (1)$$

donde:

Q = Caudal (L/min)

V = Volumen desplazado (L)

t = Tiempo (min)

4.3.4.2. Verificación de la capacidad de la bomba secundaria

Conocido el caudal requerido, se verificó que la bomba secundaria seleccionada pudiera suministrar el flujo necesario para transportar las soluciones nutritivas desde los tanques de almacenamiento hacia la tubería principal del sistema.

Para ello se consideró la potencia nominal de la bomba, la presión de trabajo y el rango de operación del variador de frecuencia, permitiendo comprobar que el sistema operara dentro de las condiciones recomendadas por el fabricante y evitando fenómenos como cavitación o sobrecarga hidráulica [46].

La potencia hidráulica puede estimarse mediante:

$$P_h = \rho g Q H \quad (2)$$

donde:

PH = Potencia hidráulica (W)

ρ = Densidad del agua (kg/m³)

g = 9.81 m/s²

Q = Caudal (m³/s)

H = Altura manométrica (m)

4.3.4.3. Calculo del sistema de inyección

Finalmente se verificó la capacidad del sistema para suministrar la cantidad requerida de solución nutritiva hacia la línea principal de riego. Para ello se estableció la relación entre el caudal de inyección y el caudal total de la red, permitiendo estimar el porcentaje de fertilizante incorporado durante la operación [46].

La relación utilizada fue:

$$R = \frac{Q_i}{Q_t} \times 100 \quad (3)$$

donde:

R = Relación de inyección (%)

Qi = Caudal de fertilizante (L/min)

Qt = Caudal total del sistema (L/min)

Tabla 29. Variables utilizadas en los cálculos hidráulicos.

Variable	Procedencia
Caudal de operación	Rotámetro
Presión PT-01	Sensor de presión (descarga de la bomba secundaria / línea de inyección)
Presión PT-02	Sensor de presión (descarga de la bomba principal / línea principal)
Frecuencia	Variador RIONO R600
Potencia nominal	Placa de la bomba
Diámetro de tubería	Diseño hidráulico
Tiempo de inyección	Algoritmo de control

4.3.5. Implementación del variador de frecuencia

Con el propósito de regular el caudal de inyección de las soluciones nutritivas, se implementó un variador de frecuencia RIONO R600 para controlar la velocidad de operación de la bomba secundaria del sistema de fertirrigación. La incorporación de este dispositivo permitió modificar la frecuencia de alimentación del motor eléctrico, ajustando su velocidad de giro de acuerdo con los requerimientos del algoritmo de control implementado. La regulación de velocidad mediante variadores de frecuencia constituye una estrategia ampliamente utilizada en sistemas de bombeo debido a que permite controlar el caudal suministrado y reducir el consumo energético del sistema.

La instalación del variador se realizó entre la red de alimentación eléctrica y el motor de la bomba secundaria, permitiendo que el equipo controle directamente la frecuencia y tensión suministradas al motor. Esta configuración posibilita modificar la velocidad de impulsión sin recurrir a dispositivos mecánicos de regulación, favoreciendo una operación más eficiente y reduciendo los esfuerzos hidráulicos sobre el sistema de bombeo.

Para la implementación del sistema se configuraron los parámetros básicos de funcionamiento del variador, considerando la tensión nominal del motor, la frecuencia de operación y el modo de control requerido para el proceso de fertirrigación. La frecuencia de trabajo fue ajustada mediante la señal generada por el algoritmo de control, permitiendo incrementar o disminuir la velocidad de la bomba secundaria en función de las condiciones hidráulicas monitoreadas durante la operación del sistema [47].

Tabla 30. Función del variador dentro del sistema automatizado.

Elemento	Función
Variador RIONO R600	Regular la velocidad del motor de la bomba secundaria.
Bomba secundaria	Succionar las soluciones nutritivas desde los tanques A y B.
RS485 Integrado en el tough	Generar la señal de control para el variador.
M5Stack Tough	Supervisar y visualizar la frecuencia de operación.
Sensores hidráulicos	Proporcionar las variables utilizadas por el algoritmo de control.

La integración del variador de frecuencia con el sistema de control se realizó mediante una red de comunicación Modbus RTU sobre RS485, utilizando al M5Stack Tough como unidad maestra de comunicación. A través de esta red se estableció el intercambio bidireccional de información con el variador, permitiendo enviar el valor de referencia de frecuencia y los parámetros de operación, así como supervisar en tiempo real el estado de funcionamiento del equipo. De esta manera, la velocidad de la bomba secundaria es ajustada automáticamente de acuerdo con las condiciones del proceso y el valor de conductividad eléctrica (CE) medido, regulando el suministro de la solución nutritiva.

La implementación de la comunicación Modbus RTU RS485 permitió integrar el variador de frecuencia dentro de la arquitectura de automatización del sistema, proporcionando una transmisión de datos confiable y con alta inmunidad a interferencias electromagnéticas, característica esencial en entornos industriales. Asimismo, esta estrategia facilitó el monitoreo continuo de las variables de operación del variador y la modificación de la frecuencia desde el M5Stack Tough, contribuyendo a mejorar la estabilidad, precisión y eficiencia del proceso automatizado de fertirrigación [47].

Tabla 31. Configuración básica del variador de frecuencia RIONO R600.

Parámetro	Configuración implementada
Equipo	Variador de frecuencia RIONO R600
Motor controlado	Bomba secundaria de inyección
Alimentación de entrada	220 VAC monofásica
Salida	220 VAC trifásica
Rango de frecuencia	49–60 Hz
Variable controlada	Frecuencia de operación de la bomba secundaria

Método de regulación	Control PI mediante variación de frecuencia
Comunicación	Modbus RTU sobre RS485
Integración	M5Stack Tough como maestro Modbus RTU

4.3.6. Cálculo de los parámetros del controlador pi

El propósito de regular automáticamente el funcionamiento de la bomba secundaria encargada de la inyección de las soluciones nutritivas, se implementó un controlador proporcional–integral (PI). Este controlador fue seleccionado debido a su amplia aplicación en procesos industriales de regulación continua, donde se requiere mantener una respuesta estable y precisa frente a variaciones de la variable de proceso. La implementación del controlador PI se realizó utilizando las funciones integradas del variador de frecuencia, permitiendo regular la velocidad de la bomba secundaria en función de la conductividad eléctrica (CE) medida durante la operación del sistema.

El funcionamiento del controlador PI parte del cálculo del error de control, definido como la diferencia entre el valor de referencia (Set Point) de la conductividad eléctrica (CE) establecido por el operador y el valor medido por el sensor durante la operación del sistema. Este error constituye la entrada principal del controlador, el cual genera la acción de control necesaria para ajustar la frecuencia de operación del variador y mantener la concentración de nutrientes dentro del rango establecido para el proceso de fertirrigación. La acción proporcional permite responder de manera inmediata a las variaciones del error, mientras que la acción integral elimina el error en estado estacionario, mejorando la precisión y estabilidad del sistema de control [48].

La expresión utilizada para determinar el error fue:

$$e(t) = SP - PV \quad (4)$$

donde:

$e(t)$ = Error del sistema.

SP = Valor de referencia (Set Point).

PV = Variable medida por el sistema.

Una vez determinado el error, el controlador calcula la acción de control mediante la combinación de dos términos: proporcional e integral. La acción proporcional responde de

manera inmediata a las variaciones del error presente, proporcionando una corrección rápida de la frecuencia de operación del variador. Por su parte, la acción integral compensa el error acumulado a lo largo del tiempo, eliminando el error en estado estacionario y permitiendo que la conductividad eléctrica (CE) alcance y mantenga el valor de referencia establecido. La combinación de ambas acciones proporciona un control estable y preciso del proceso de fertirrigación, mejorando la respuesta dinámica del sistema frente a las variaciones de la concentración de nutrientes [48].

La ecuación general del controlador PI implementada se expresa como:

$$u(t) = K_p E(t) + K_i \int e(t) dt \quad (5)$$

donde:

$u(t)$ = Señal de control.

K_p = Ganancia proporcional.

K_i = Ganancia integral.

$e(t)$ = Error del sistema.

Tabla 32. Parámetros del controlador PI.

Parámetro	Símbolo	Función
Error	(e(t))	Diferencia entre el Set Point y la variable medida
Ganancia proporcional	(K _p)	Corrige el error instantáneo
Ganancia integral	(K _i)	Elimina el error en estado estacionario
Señal de control	(u(t))	Frecuencia enviada al variador

Durante el desarrollo del sistema, la determinación de las constantes K_p y k_i se realizó mediante un procedimiento de sintonización experimental. Inicialmente se estableció un valor para la ganancia proporcional y posteriormente se ajustó de forma progresiva la acción integral hasta obtener una respuesta estable del sistema, minimizando el error en estado estacionario y evitando oscilaciones excesivas durante el proceso de regulación. Este procedimiento permitió adaptar el controlador PI a las características dinámicas del sistema hidráulico de fertirrigación y garantizar un control adecuado de la conductividad eléctrica (CE) [48].

Finalmente, los parámetros de sintonización fueron configurados en el variador de frecuencia RIONO R600, el cual incorpora de forma nativa el controlador PI. El M5Stack Tough, actuando

como maestro de la red Modbus RTU sobre RS485, supervisa continuamente la conductividad eléctrica (CE), calcula el error entre el valor medido y el Set Point, y gestiona la comunicación con el variador. Con base en esta información, el controlador PI ajusta automáticamente la frecuencia de operación de la bomba secundaria, regulando la inyección de la solución nutritiva para mantener la conductividad eléctrica dentro del rango de operación establecido.

Tabla 33. Variables utilizadas por el controlador PI.

Variable	Procedencia
Set Point (CE)	Valor de referencia definido por el usuario desde el M5Stack Tough
Conductividad eléctrica (CE)	Sensor de conductividad eléctrica RS485 Modbus RTU
Presión PT-01	Sensor de presión I2C (línea de succión secundaria)
Presión PT-02	Sensor de presión I2C (línea de impulsión principal)
Caudal	Caudalímetro RS485 Modbus RTU
Frecuencia de salida	Variador de frecuencia RIONO R600 (Modbus RTU)

5. ANALISIS Y DISCUSION DE RESULTADOS

En los resultados obtenidos durante la validación del sistema automatizado de fertirrigación, la evaluación se organizó en cinco bloques principales: sistema hidráulico, sistema de monitoreo, controlador PI, variador de frecuencia y desempeño global del sistema automatizado. La secuencia de pruebas permitió comprobar de manera progresiva el comportamiento hidráulico de la instalación, la adquisición y comunicación de las variables mediante Modbus RTU, la respuesta del controlador PI, el funcionamiento del variador de frecuencia ante las órdenes emitidas por el controlador maestro y, finalmente, el desempeño general del sistema automatizado. La validación se realizó mediante pruebas y registros de las variables de operación del sistema, permitiendo verificar el comportamiento hidráulico, la adquisición de datos, la comunicación Modbus RTU, la respuesta del controlador PI y el funcionamiento del variador de frecuencia.



Figura 9. Vista general del sistema automatizado de inyección para fertirrigación implementado.

La estrategia de programación se estructuró principalmente con base en la conductividad eléctrica (CE), debido a que esta variable se relaciona con la concentración de sales y nutrientes disueltos en la solución nutritiva. Para el cultivo de rosas se estableció como rango de referencia una CE entre 1,5 y 2,5 mS/cm. Por esta razón, la CE fue considerada como la variable principal para la toma de decisiones del algoritmo, mientras que el pH y el caudal se emplearon como variables complementarias de supervisión y seguridad operacional.

Tabla 34. Parámetros de operación considerados en la validación.

Parámetro	Valor de referencia	Aplicación en el sistema
pH	6,0 - 7,0	Variable supervisada para verificar la disponibilidad de nutrientes.
Conductividad eléctrica	1,5–2,5 mS/cm (rango recomendado); consigna experimental: 1510 μ S/cm	Variable principal de supervisión y del controlador PI.
Flujómetro	DN50; RS485/Modbus RTU	Medición del caudal de la línea principal.
Variador de frecuencia	R600-0R7G-S2; 0,51 kW; 220 V	Regulación de la velocidad de la bomba secundaria.
Red de comunicación	RS485 con protocolo Modbus RTU	M5Stack Tough como maestro; dispositivos de campo como esclavos.

Tabla 35. Estructura de la validación de pruebas.

Bloque de validación	Objetivo	Evidencia principal
Sistema hidráulico	Verificar ausencia de fugas, continuidad del flujo y estabilidad de la instalación.	Inspección visual de depósitos, tuberías, bomba, uniones y accesorios.
Monitoreo	Comprobar la lectura de pH, CE y caudal.	Sensores instalados y conectados al bus RS-485.
Supervisión	Validar la interfaz local y la visualización en tiempo real.	M5Stack Tough integrado en el tablero.
Control pi	Evaluar el cálculo del error y la acción sobre el variador.	Consigna de CE, salida de control y frecuencia de operación.
Sistema automatizado	Comparar operación manual y automática.	Comportamiento integral de la instalación.

5.1. VALIDACIÓN DEL FUNCIONAMIENTO DEL SISTEMA AUTOMATIZADO

Una vez finalizada la implementación del sistema automatizado de fertirrigación, se realizaron pruebas con el propósito de verificar el correcto funcionamiento de los dispositivos que integran el prototipo desarrollado. Estas pruebas permitieron comprobar la comunicación entre los sensores, el sistema de adquisición de datos, la interfaz de supervisión y los elementos de control responsables del proceso de dosificación de fertilizantes.

La validación se llevó a cabo de manera secuencial, iniciando con la verificación de la comunicación RS485 de los sensores industriales de pH y conductividad eléctrica (CE). Posteriormente, se evaluó la adquisición de las variables hidráulicas mediante los sensores de presión PT-01 y PT-02, el flujómetro ultrasónico y los sensores de nivel instalados en los tanques de fertilización. Finalmente, se verificó el funcionamiento del algoritmo de control y la regulación de la bomba secundaria mediante el variador de frecuencia.

El análisis presentado en este capítulo se fundamenta en los datos obtenidos durante las pruebas realizadas sobre el prototipo construido, permitiendo evaluar el desempeño del sistema de monitoreo y control implementado para el proceso automatizado de fertirrigación.

5.1.1. Validación de la comunicación RS485

Como primera etapa de validación se comprobó el funcionamiento de la comunicación RS485 Modbus RTU empleada para la adquisición de datos provenientes de los sensores industriales

de potencial de hidrógeno (pH) y conductividad eléctrica (CE). Para ello se verificó el intercambio de información entre los sensores, el Arduino Uno y el M5Stack Tough, comprobando que las tramas Modbus fueran recibidas y procesadas correctamente por el sistema de adquisición.

Durante las pruebas se observó una comunicación estable entre los dispositivos, permitiendo la lectura continua de los registros correspondientes a las variables de pH y CE. Las mediciones obtenidas fueron transmitidas al M5Stack Tough, donde se visualizaron en tiempo real para facilitar el monitoreo del proceso de fertirrigación.

Con el propósito de verificar la confiabilidad de la comunicación, se realizaron múltiples ciclos de lectura durante la operación del sistema, comprobando que no se presentaron pérdidas de comunicación ni errores en la recepción de los datos. Asimismo, se verificó que las mediciones mostradas en la interfaz gráfica correspondieran con la información enviada por los sensores industriales mediante el protocolo RS485 Modbus RTU.

Tabla 36. Configuración de la comunicación RS485 utilizada durante las pruebas.

Parámetro	Configuración
Protocolo de comunicación	Modbus RTU
Medio de transmisión	RS485
Maestro	M5Stack Tough
Esclavos	Sensor pH/CE, flujómetro ultrasónico y variador RIONO R600
Interfaz de supervisión	Pantalla táctil integrada del M5Stack Tough
Tipo de consulta	Lectura de Holding Registers
Modo de comunicación	Maestro – Esclavo

La Tabla 36 presenta la configuración de comunicación empleada durante las pruebas de validación del sistema automatizado. Para la adquisición de la variable de conductividad eléctrica (CE) se implementó el protocolo Modbus RTU sobre una red RS485. Durante la etapa de validación y verificación se empleó un Arduino Nano como dispositivo maestro para realizar la consulta de los registros (Holding Registers) de los sensores industriales configurados como

dispositivos esclavos, con el propósito de comprobar el correcto funcionamiento de la comunicación y validar los datos obtenidos por los instrumentos de medición. Posteriormente, en la implementación definitiva del sistema, estas funciones fueron asumidas por el M5Stack Tough, el cual actúa como maestro de la red Modbus RTU, integrando la adquisición, procesamiento y visualización de la información en una única plataforma. Esta configuración permitió establecer una comunicación confiable entre los dispositivos y garantizar la adquisición continua de las variables fisicoquímicas del sistema de fertirrigación.

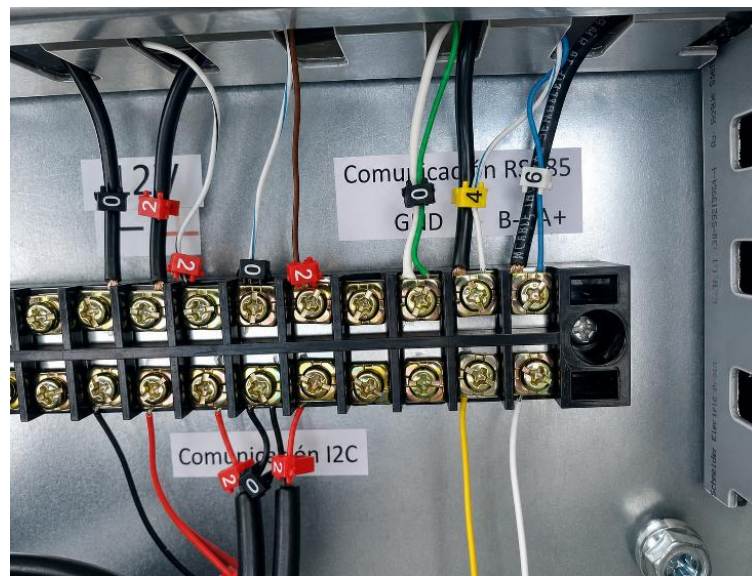


Figura 10. Implementación física de las comunicaciones.

La Figura 10 presenta la implementación física de la red de comunicación RS485 utilizada para la adquisición de la variable conductividad eléctrica (CE). El sistema utiliza el M5Stack Tough como dispositivo maestro, encargado de consultar periódicamente a los sensores industriales configurados como esclavos mediante el protocolo Modbus RTU. La comunicación establecida permitió la lectura continua de las variables del proceso, su procesamiento y visualización en tiempo real en la interfaz HMI implementada en el M5Stack Tough, facilitando el monitoreo de la solución nutritiva durante la fertirrigación.

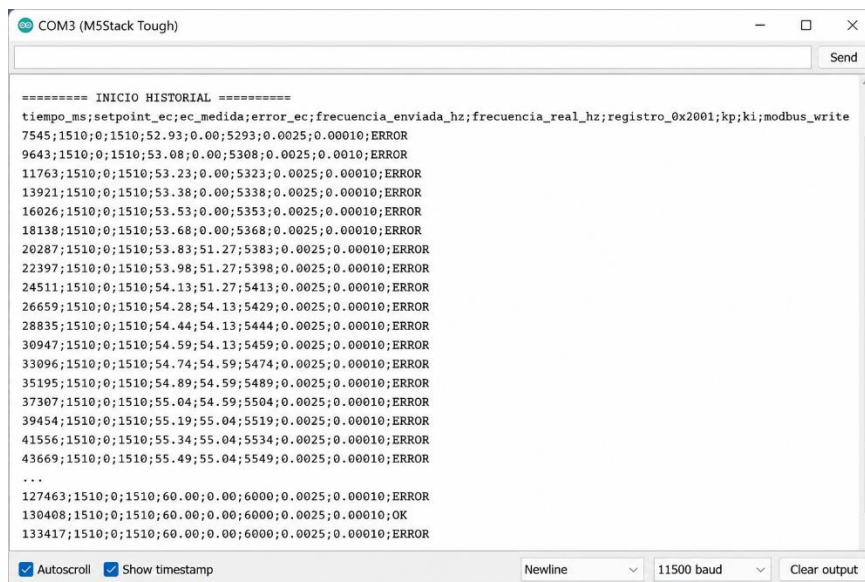


Figura 11. Validación de la comunicación RS485.

La Figura 11 presenta la validación experimental de la comunicación RS485 durante las pruebas de funcionamiento del sistema. En el monitor serial se observa la recepción continua de las variables adquiridas por los sensores industriales, incluyendo los valores de pH, conductividad eléctrica (CE), caudal y señales analógicas correspondientes al sistema de monitoreo. La actualización periódica de las mediciones confirma el correcto intercambio de información entre los dispositivos conectados a las bornas RS485, sin evidenciar pérdidas de comunicación durante las pruebas realizadas.

5.1.2. Validación de la adquisición de variables del proceso

Una vez verificada la comunicación RS485 entre el sistema de adquisición y los sensores industriales, se procedió a validar la adquisición continua de las variables de operación del sistema automatizado de fertirrigación. Para ello, se realizaron pruebas durante el funcionamiento del prototipo, registrando de forma simultánea las mediciones de potencial de hidrógeno (pH), conductividad eléctrica (CE), presión en los puntos PT-01 y PT-02, así como el caudal del sistema.

Durante las pruebas se obtuvo un total de 2333 registros consecutivos, correspondientes aproximadamente a 39 minutos de monitoreo continuo, permitiendo verificar la estabilidad del sistema de adquisición y la correcta integración de los sensores instalados en el sistema automatizado de inyección. La información recopilada fue almacenada para su posterior análisis y evaluación del comportamiento hidráulico y fisicoquímico del proceso.

Tabla 37 .Resumen estadístico de las variables monitoreadas durante las pruebas.

Variable	Mínimo	Máximo	Promedio
PT-01 (bar)	2.12	4.49	3.42
PT-02 (bar)	2.03	4.62	3.46
pH	5.71	7.02	6.309
CE ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	297	2997	1519.30
Caudal (m^3/h)	0.00	15.52	7.76

La Tabla 37 evidencia que el sistema automatizado fue capaz de registrar continuamente las variables de operación durante todo el periodo de evaluación. Las mediciones obtenidas permitieron identificar el rango de variación de cada parámetro y verificar el correcto funcionamiento del sistema de adquisición de datos implementado. Asimismo, la ausencia de interrupciones en el registro de las variables confirma la estabilidad de la comunicación y del proceso de monitoreo desarrollado para el prototipo.

Posteriormente, cada una de las variables registradas fue analizada de manera individual con el propósito de evaluar su comportamiento durante la operación del sistema automatizado de fertirrigación.

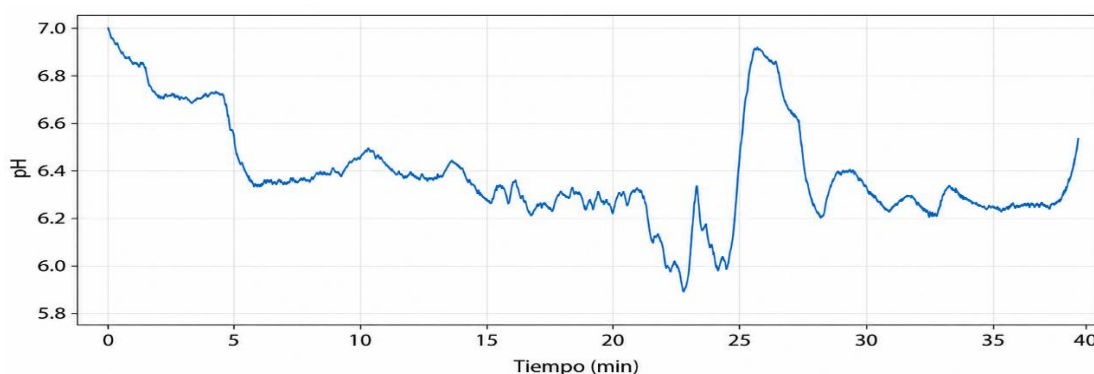


Figura 12. Comportamiento del potencial de hidrógeno (pH) durante las pruebas experimentales.

La Figura 12 muestra la evolución del potencial de hidrógeno durante el periodo de monitoreo. Se observa que las mediciones permanecieron dentro del rango de operación establecido para el sistema, presentando pequeñas variaciones atribuibles a la dinámica del proceso y a las condiciones propias de la dosificación de nutrientes. En general, el comportamiento del pH evidenció estabilidad durante el tiempo de evaluación, confirmando la correcta adquisición de esta variable mediante el sensor industrial RS485.

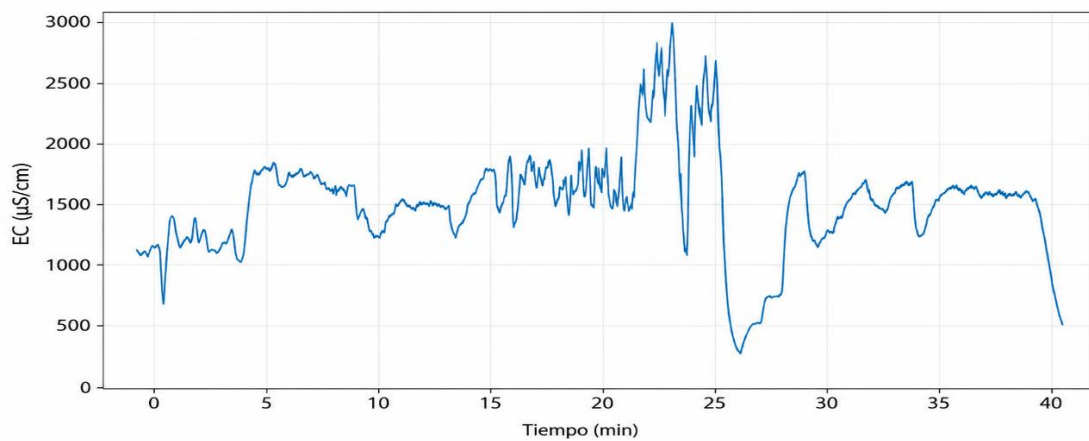


Figura 13. Comportamiento de la conductividad eléctrica (CE) durante las pruebas.

La Figura 13 presenta el comportamiento de la conductividad eléctrica registrada durante las pruebas. Las mediciones reflejan las variaciones en la concentración de nutrientes presentes en la solución de fertirrigación, permitiendo verificar el correcto funcionamiento del sensor de conductividad eléctrica y la adquisición continua de los datos mediante comunicación RS485.

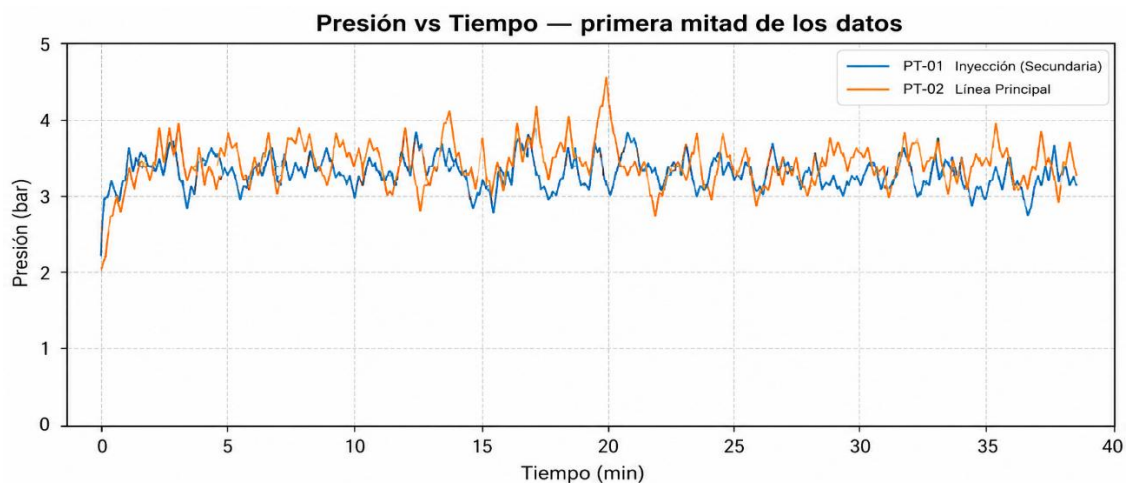


Figura 14. Comportamiento de las presiones PT-01 y PT-02 durante las pruebas experimentales.

La Figura 14 muestra el comportamiento de la presión registrada por los sensores PT-01 (Inyección Secundaria) y PT-02 (Línea Principal) durante la validación del proceso de inyección de fertilizantes. Ambos sensores permitieron monitorear la respuesta del sistema en diferentes puntos del sistema de inyección para fertirrigación, evidenciando un comportamiento estable y una tendencia similar a lo largo de todo el ensayo. Se observan pequeñas fluctuaciones en ambas señales, las cuales corresponden a las variaciones normales del sistema hidráulico asociadas al funcionamiento de las bombas y al proceso de inyección, sin presentarse cambios

bruscos que comprometan la estabilidad del sistema. Aunque el sensor PT-02 presenta una mayor variabilidad respecto al PT-01 debido a las condiciones dinámicas de la línea principal, ambas mediciones muestran una adecuada concordancia y se encuentran dentro del margen de exactitud especificado por el fabricante para los sensores ($\pm 0,5\%$). En consecuencia, los resultados obtenidos validan el correcto funcionamiento del sistema de monitoreo y confirman que el proceso de inyección de fertilizantes se desarrolló bajo condiciones hidráulicas estables y confiables.

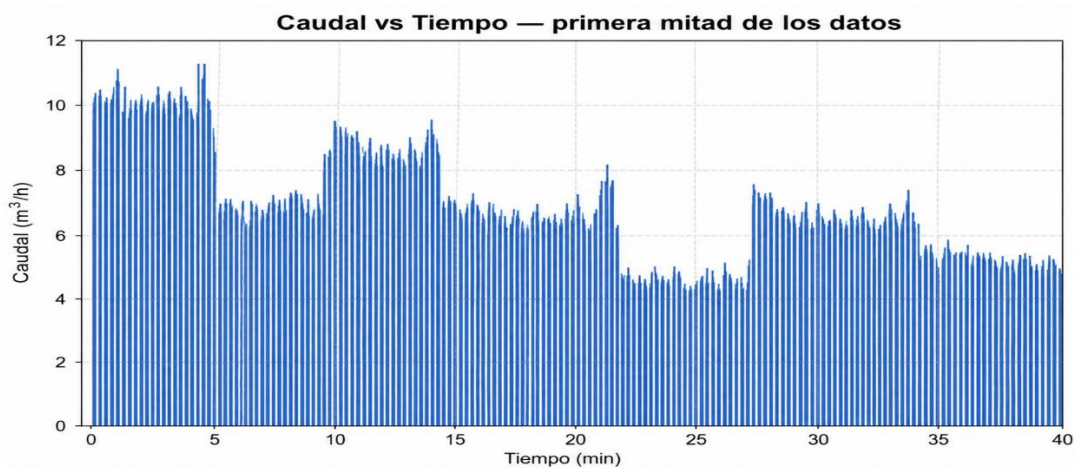


Figura 15. Comportamiento del caudal durante las pruebas.

La Figura 15 presenta el comportamiento del caudal registrado durante las pruebas. Las mediciones permitieron verificar la continuidad del flujo en la línea de inyección y corroborar el funcionamiento del sistema hidráulico durante la operación del prototipo. La información obtenida constituye una variable de apoyo para el monitoreo del proceso y la evaluación del desempeño del sistema automatizado.

Durante las pruebas se observan registros puntuales con valores de $0\text{ m}^3/\text{h}$. Estas mediciones no corresponden a una pérdida del flujo ni a una falla del rotámetro, sino a la lógica de adquisición implementada en la versión actual del programa del controlador. Debido a que la lectura del sensor de caudal se realiza de manera periódica, cuando no se recibe una nueva actualización del dato el sistema registra temporalmente un valor igual a cero antes de almacenar la siguiente medición válida. Este comportamiento corresponde al algoritmo de adquisición de datos y no afectó el funcionamiento general del sistema ni el proceso de monitoreo desarrollado para la validación.

La validación hidráulica tuvo como finalidad comprobar que el montaje físico permitiera transportar la solución sin pérdidas visibles, obstrucciones ni condiciones que comprometieran la lectura de los sensores. Antes de activar la automatización se inspeccionaron los depósitos, las uniones roscadas, los accesorios de PVC, la bomba y los tramos donde se instalaron los instrumentos.

En la inspección visual se identificó una red construida principalmente con tubería de PVC y accesorios desmontables. Este tipo de montaje facilita el mantenimiento y el reemplazo de componentes, aunque exige verificar periódicamente el ajuste de uniones y sellos. La ubicación de los instrumentos en tramos accesibles favorece la calibración y la revisión del cableado.

5.1.3. Validación hidráulica y pruebas de presión

Tabla 38. Lista de comprobación de la prueba de presión.

Condición evaluada	Criterio de aceptación	Resultado observado
Uniones y accesorios	Sin goteo visible durante la operación.	No se aprecian fugas evidentes en el recorrido mostrado.
Tuberías	Sin deformación o vibración excesiva.	La instalación se observa estable durante la inspección.
Bomba	Funcionamiento sin desplazamiento del conjunto.	El equipo permanece fijo en su base.
Presión numérica	Valor dentro del rango de diseño.	Pendiente de incorporar desde el registro experimental.

Durante la validación experimental se registraron de manera continua las señales correspondientes a los sensores de presión PT-01 y PT-02, obteniéndose un total de 747 muestras para cada canal. Los registros permitieron evaluar la estabilidad del sistema hidráulico durante la operación del proceso de fertirrigación.

Considerando la conversión del sensor de 0–10 bar (4–20 mA), la presión medida presentó un comportamiento estable durante el período de ensayo. Para el sensor PT-01 se obtuvo una presión promedio aproximada de 3.42 bar, con valores comprendidos entre 2.12 y 4.49 bar. En el sensor PT-02 la presión promedio fue de 3.46 bar, registrándose valores entre 2.03 y 4.62 bar como se muestra en la Tabla 37. Las variaciones observadas corresponden a los cambios

normales de operación del sistema durante el funcionamiento de la bomba y del proceso de dosificación, sin evidenciar pérdidas de estabilidad en la adquisición de datos.

Tabla 39. Resumen de la adquisición de señales analógicas de los sensores de presión.

Parámetro		PT-01 (A1)	PT-02 (A2)
Tipo de sensor		Transmisor de presión 4–20 mA	Transmisor de presión 4–20 mA
Rango nominal		0–10 bar	0–10 bar
Canal de adquisición		A1	A2
Resolución ADC		Lectura digital mediante interfaz de adquisición	Lectura digital mediante interfaz de adquisición
Número de muestras registradas		747	747
Valor mínimo registrado (bar)		2.12	2.03
Valor máximo registrado (bar)		4.49	4.62
Valor promedio (bar)		≈ 3.42	≈ 3.46
Método de adquisición		Adquisición mediante módulo/interfaz I2C hacia el M5Stack Tough	Adquisición mediante módulo/interfaz I2C hacia el M5Stack Tough
Frecuencia de adquisición		Continua durante la prueba experimental	Continua durante la prueba experimental
Estado de la señal		Estable, sin pérdidas de lectura	Estable, sin pérdidas de lectura

La Tabla 39 resume los resultados obtenidos durante la adquisición de las señales analógicas correspondientes a los sensores de presión PT-01 y PT-02. Para la validación se empleó un Arduino Nano, el cual realizó la lectura continua de las entradas analógicas A1 y A2 mediante el convertidor analógico-digital de 10 bits. Durante la prueba se registraron 747 muestras por cada canal, observándose un comportamiento estable de ambas señales y sin pérdidas en la adquisición de datos. Los valores obtenidos permitieron verificar el correcto funcionamiento del sistema de medición y constituyeron la base para la posterior calibración y procesamiento de las variables de presión.

5.1.4. Validación de la bomba secundaria mediante presión y curva H-Q

Con el propósito de complementar la validación hidráulica del sistema de fertirrigación, se analizó el comportamiento de la bomba secundaria KSB TX03/2/70 T2, debido a que este equipo es el encargado de realizar la inyección de fertilizante hacia la línea principal. Para este análisis se relacionó la curva característica H-Q de la bomba con las presiones registradas por los sensores PT-01 y PT-02.

El sensor PT-01 registra la presión existente en la línea de inyección, mientras que el sensor PT-02 registra la presión de la línea principal de fertirrigación. De esta manera, las mediciones de presión permiten complementar experimentalmente el análisis realizado mediante la curva característica de la bomba secundaria.

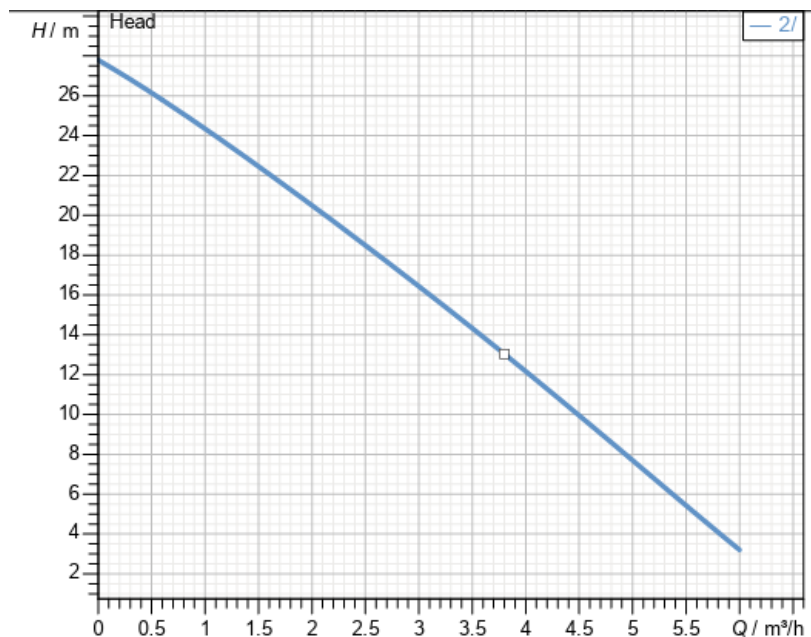


Figura 16. Curva característica H-Q de la bomba secundaria KSB TX 03/2/70T2.

La curva característica H-Q de la bomba KSB TX 03/2/70T2 establece la relación entre el caudal de operación y la altura manométrica desarrollada por la bomba. Por esta razón, permite determinar la capacidad hidráulica disponible para el proceso de inyección en función del caudal de funcionamiento.

Esta relación se representa mediante:

$$H_{iny} = f(Q_{iny}) \quad (6)$$

Donde:

H_{iny} : altura manométrica desarrollada por la bomba KSB TX 03/2/70 T2, en (m).

Q_{iny} : caudal de la bomba secundaria de inyección, en m³/h.

$f(Q_{iny})$: relación entre el caudal y la altura establecida por la curva característica de la bomba

La altura manométrica obtenida de la curva puede convertirse en incremento de presión mediante:

$$\Delta P_{iny} = \rho g H_{iny} \quad (7)$$

Donde:

ΔP_{iny} : incremento de presión desarrollado por la bomba, en Pa.

ρ : densidad del fluido, en kg/m³.

g : aceleración de la gravedad, en m/s².

H_{iny} : altura manométrica obtenida de la curva H-Q, en m.

Para agua se considera:

$$\rho = 1000 \text{ kg/m}^3$$

$$g = 9.81 \text{ m/s}^2$$

Sustituyendo:

$$\Delta P_{iny} = (1000)(9.81)H_{iny}$$

$$\Delta P_{iny} = 9810 H_{iny} \text{ Pa}$$

Considerando que:

$$1 \text{ bar} = 100000 \text{ Pa}$$

Se obtiene:

$$\Delta P_{iny}(\text{bar}) = 0.0981 H_{iny}(\text{m})$$

Esta expresión permite relacionar directamente la altura indicada en la curva KSB TX03/2/70T2 con el incremento de presión desarrollado por la bomba de inyección.

5.1.5. Análisis de las presiones pt-01

Durante las pruebas experimentales se obtuvieron las siguientes presiones promedio:

$$P_{PT01} = 3.42 \text{ bar} \quad (8)$$

Donde:

P_{PT01} : presión promedio registrada en la línea de inyección.

Para relacionar estas mediciones con la altura manométrica utilizada en la curva H-Q se emplea:

$$P = \rho g H$$

Despejando la altura:

$$H = \frac{P}{\rho g}$$

Para agua y utilizando directamente la presión en bar:

$$H(m) = \frac{P(bar)}{0.0981} \quad (9)$$

Donde:

H: altura equivalente de presión, en m.c.a.

P: presión medida, en bar.

0.0981: factor de conversión entre metros de columna de agua y bar.

5.1.6. Presión de la línea de inyección pt-01

La presión promedio registrada por PT-01 fue:

$$P_{PT01} = 3.42 \text{ bar}$$

Su altura equivalente es:

$$H_{PT01} = \frac{P_{PT01}}{0.0981}$$

Sustituyendo:

$$H_{PT01} = \frac{3.42}{0.0981}$$

$$H_{PT01} = 34.86 \text{ m. c. a}$$

Por tanto:

$$3.42 \text{ bar} \approx 34.86 \text{ m. c. a}$$

Este resultado representa la presión existente en la línea de inyección durante el funcionamiento del sistema.

5.2. VALIDACIÓN DE LA BOMBA SECUNDARIA KSB TX03/2/70 T2

La validación hidráulica de la bomba secundaria KSB TX03/2/70T2 se sustentó en la presión registrada en la línea de inyección mediante el sensor PT-01 y en la capacidad hidráulica indicada por la curva característica H-Q de la bomba.

Durante las pruebas, PT-01 registró una presión promedio de:

$$P_{PT01} = 3.42 \text{ bar}$$

La altura equivalente correspondiente se determinó mediante:

$$H_{PT01} = \frac{P_{PT01}}{0.0981}$$

Sustituyendo:

$$H_{PT01} = \frac{3.42}{0.0981}$$

$$H_{PT01} = 34.86 \text{ m. c. a}$$

Por tanto:

$$3.42 \text{ bar} \approx 34.86 \text{ m. c. a}$$

Este resultado confirma que durante la operación del sistema se estableció una condición de presión efectiva en la línea secundaria de inyección. La curva H-Q de la bomba KSB TX3/2/70 T2 complementa esta validación, ya que permite relacionar el caudal de operación con la altura manométrica disponible y, por tanto, con el incremento de presión que la bomba puede desarrollar:

$$\Delta P_{iny}(\text{bar}) = 0.0981 H_{iny}(\text{m})$$

En consecuencia, la combinación de la presión de 3.42 bar registrada por PT-01 y la capacidad hidráulica definida por la curva característica H-Q permite validar el uso de la bomba KSB TX3/2/70 T2 dentro del circuito secundario del sistema de fertirrigación. Los resultados evidencian que la bomba operó generando las condiciones hidráulicas necesarias en la línea de inyección, por lo que su incorporación al sistema resultó funcional para la aplicación desarrollada.

5.3. PRUEBAS DE CAUDAL

La prueba de caudal se orientó a comprobar la circulación continua de la solución y la respuesta del flujómetro ultrasónico. El instrumento se encuentra instalado directamente en la tubería principal, lo cual permite obtener el caudal instantáneo y, dependiendo de la configuración del equipo, el volumen acumulado. La comunicación con el controlador se realiza mediante RS-485 y Modbus RTU.

La disposición observada permite asociar las variaciones de frecuencia del variador con cambios en el caudal. Para una validación cuantitativa se recomienda realizar al menos cinco puntos de operación, desde una frecuencia baja hasta la frecuencia nominal, manteniendo constantes las condiciones de apertura de las válvulas manuales.

Tabla 40.Registro experimental para la validación de la respuesta del sistema.

Ensayo	Frecuencia del variador (Hz)	PT-01 (bar)	PT-02 (bar)	Observación
1	0.00	2.12	2.03	Sistema en reposo
2	49.10	3	3	Inicio de estabilización
3	50.10	3.21	3.25	Operación estable
4	53.80	3.44	3.47	Incremento de presión por aumento de frecuencia
5	54.01	3.49	3.51	Estado estacionario del sistema

La Tabla 40 presenta un resumen de los ensayos realizados para validar el comportamiento del sistema durante el proceso de fertirrigación. Inicialmente, con el variador detenido (0 Hz), las lecturas de los sensores PT-01 y PT-02 permanecieron en los valores de referencia correspondientes al estado sin circulación de fluido. Posteriormente, al incrementar progresivamente la frecuencia del variador mediante comunicación Modbus, se observó un aumento en las lecturas analógicas de ambos sensores de presión, evidenciando la respuesta del sistema hidráulico ante el incremento de la velocidad de la bomba. Finalmente, al alcanzar aproximadamente 52 Hz, las señales adquiridas mostraron un comportamiento estable, confirmando el correcto funcionamiento de la adquisición de datos y la comunicación entre el variador y el sistema de supervisión.

El error relativo puede calcularse mediante la expresión:

$$Error(\%) = \left(\frac{Q_{sensor} - Q_{referencia}}{Q_{referencia} \times 100} \right)$$

Este indicador permite cuantificar la concordancia entre el flujómetro y un método patrón, como el aforo volumétrico durante un tiempo conocido.

5.4. EVALUACION DE PERDIDAS

5.4.1. Perdidas por fricción

Para calcular las pérdidas por fricción en las tuberías se utiliza la ecuación de Darcy-Weisbach:

$$H_f = f \frac{L}{D} \frac{V^2}{2g} \quad (10)$$

Donde:

H_f : pérdida de carga por fricción, en m.c.a.

f : factor de fricción de Darcy, adimensional.

L : longitud del tramo de tubería, en m.

D : diámetro interno de la tubería, en m.

V : velocidad del fluido, en m/s^2

g : aceleración de la gravedad, 9.81.

Para el cálculo se tomó como caudal representativo:

$$Q = 6.25 \text{ m}^3/h$$

equivalente a:

$$Q = \frac{6.25}{3600}$$

$$Q = 0.001736 \text{ m}^3/h$$

Considerando los tramos de tubería:

$$H_{f,2"} \approx 0.063 \text{ m. c. a}$$

$$H_{f,1.5"} \approx 0.153 \text{ m. c. a}$$

$$H_{f,1"} \approx 3.204 \text{ m. c. a}$$

La pérdida total por fricción es:

$$H_f = 0.063 + 0.158 + 3.204$$

$$H_f = 3.42 \text{ m.c.a}$$

Para convertir esta pérdida a presión:

$$\Delta P_f = 0.0981 H_f \quad (11)$$

Donde:

ΔP_f : pérdida de presión por fricción, en bar.

H_f : pérdida por fricción, en m.c.a.

0.0981: factor de conversión de metros de columna de agua a bar.de:

Sustituyendo:

$$\Delta P_f = 0.0981(3.42)$$

$$\Delta P_f = 0.34 \text{ bar}$$

5.4.2. Perdidas por accesorios

Las pérdidas localizadas producidas por válvulas, válvula check, rotámetro y demás accesorios se calculan mediante:

$$H_m = \sum K \frac{V^2}{2g} \quad (12)$$

Donde:

H_m : pérdida de carga por accesorios, en m.c.a.

K: coeficiente de pérdida de cada accesorio, adimensional.

$\sum K$: suma de los coeficientes de pérdida de los accesorios considerados.

V: velocidad del fluido, en m/s.

g: aceleración de la gravedad, 9.81 m/s^2 .

Para el tramo de 1", con el caudal representativo de $6.25 \text{ m}^3/\text{h}$:

$$V \approx 3.43 \text{ m/s}$$

Por tanto:

$$\frac{V^2}{2g} = \frac{(3.43)^2}{2(9.81)}$$

$$\frac{V^2}{2g} \approx 0.598 \text{ m}$$

Considerando:

$$\sum K = 6.15$$

Se obtiene:

$$H_m = 6.15(0.598)$$

$$H_m \approx 3.68 \text{ m.c.a}$$

Para convertir a presión:

$$\Delta P_m = 0.0981 H_m$$

Donde:

ΔP_m : pérdida de presión por accesorios, en bar.

H_m : pérdida localizada por accesorios, en m.c.a.

Sustituyendo:

$$\Delta P_m = 0.0981(3.68)$$

$$\Delta P_m = 0.36 \text{ bar}$$

5.4.3. Pérdidas totales

La pérdida hidráulica total se obtiene sumando las pérdidas por fricción y las pérdidas por accesorios:

$$H_L = H_f + H_m \quad (13)$$

Donde:

H_L : pérdida total de carga del sistema, en m.c.a.

H_f : pérdida por fricción en las tuberías, en m.c.a.

H_m : pérdida por accesorios, en m.c.a.

Sustituyendo:

$$H_L = 3.42 + 3.68$$

$$H_L = 7.10 \text{ m.c.a}$$

La pérdida total expresada en presión es:

$$\Delta P_L = 0.0981 H_L \quad (14)$$

Donde:

ΔP_L : pérdida total de presión, en bar.

H_L : pérdida total de carga, en m.c.a.

0.0981: factor de conversión de m.c.a. a bar.

Sustituyendo:

$$\Delta P_L = 0.0981 (7.10)$$

$$\Delta P_L \approx 0.70 \text{ bar}$$

Considerando un caudal representativo de 6.25 m³/h, se evaluaron las pérdidas hidráulicas generadas por la fricción en las tuberías y por los accesorios instalados a lo largo del sistema. Al final del recorrido se registró mediante manómetro una presión de 35 psi, equivalente a 2.41 bar, lo que evidencia que el sistema mantiene presión disponible después de superar las pérdidas hidráulicas presentes en la instalación. En conjunto, los resultados permiten validar el comportamiento hidráulico y la funcionalidad de la configuración implementada, demostrando que el sistema conserva condiciones de presión adecuadas durante su operación.

5.5. VALIDACIÓN DEL SISTEMA DE MONITOR

El sistema de monitoreo integra un sensor de conductividad eléctrica, un flujómetro ultrasónico y el variador de frecuencia dentro de una única red Modbus RTU. El M5Stack Tough funciona como maestro y consulta secuencialmente a cada dispositivo esclavo. Esta organización evita que los equipos transmitan simultáneamente y permite centralizar la información en la interfaz HMI.



Figura 17. Interfaz de HMI

Tabla 41. Dispositivos integrados en la red de monitoreo.

Dispositivo	Variable o función	Papel en la red
M5Stack Tough	Procesamiento, interfaz y control	Maestro Modbus RTU
Sensor combinado pH + CE	pH, CE y temperatura	Esclavo 1
Flujómetro ultrasónico	Caudal y totalización	Esclavo 2
Variador R600	Frecuencia, marcha y estado	Esclavo 4

5.5.1. Validación del sensor de CE

La conductividad eléctrica constituye la variable principal de la programación implementada. La elección se fundamenta en que la CE refleja la cantidad de sales disueltas y, por tanto, proporciona una referencia directa para determinar si la solución nutritiva se encuentra por debajo, dentro o por encima de la concentración deseada.

Los registros obtenidos demuestran que la información transmitida por el sensor fue recibida correctamente por el controlador, ya que la lectura de conductividad eléctrica fue utilizada en el cálculo del error y en la generación de la frecuencia de referencia enviada al variador mediante el protocolo Modbus RTU. Durante el ensayo, la frecuencia enviada aumentó progresivamente desde 49Hz hasta 60.00 Hz, confirmando el correcto funcionamiento de la adquisición de datos, el procesamiento de la señal del sensor y la integración entre el sensor CE, el controlador y el variador de frecuencia [49].

Tabla 42. Validación funcional del sensor de conductividad eléctrica.

Parámetro evaluado	Resultado obtenido	Verificación
Comunicación Modbus RTU	Correcta	El controlador recibió la información del sensor durante todo el ensayo.
Consigna de CE	1510	Valor configurado correctamente.
CE medida	0	Lectura registrada durante la prueba con el sistema detenido.
Error calculado	1510	El algoritmo calculó correctamente la diferencia entre la consigna y la medición.
Acción del controlador	Incremento de frecuencia	La frecuencia enviada varió transitoriamente según el error del PI, dentro de los límites configurados de 49 a 60 Hz; la referencia estable empleada en la comparación fue 52 Hz.
Estado de la validación	Satisfactoria	Se verificó la adquisición y el procesamiento de la señal del sensor CE dentro del sistema de control.

La Tabla 42 presenta los resultados de la validación funcional del sensor de conductividad eléctrica (CE) integrado al sistema automatizado de fertirrigación. Durante el ensayo se verificó el correcto intercambio de información entre el sensor y el M5Stack Tough mediante el protocolo Modbus RTU, permitiendo la adquisición continua de la variable de conductividad eléctrica. Asimismo, se comprobó que el controlador recibió correctamente la consigna de 1510 unidades internas y procesó la lectura proporcionada por el sensor para el cálculo del error de control.

Debido a que el sistema hidráulico permaneció detenido durante la prueba, la lectura del sensor se mantuvo en 0, condición que generó un error constante de 1510. Esta situación permitió verificar el correcto funcionamiento de la adquisición de datos y del algoritmo de control, ya que el controlador respondió incrementando progresivamente la frecuencia de referencia enviada al variador desde 49 Hz manteniéndose 52.93 Hz hasta 60.00 Hz como máximo, conforme a la lógica establecida para una condición de baja conductividad eléctrica.

Los resultados obtenidos confirman que el sensor de conductividad eléctrica se integró correctamente al sistema de supervisión y control, permitiendo la lectura de la variable de proceso y su utilización en el cálculo del error del controlador PI. En consecuencia, la validación funcional se considera satisfactoria, al demostrarse el correcto funcionamiento de la

comunicación Modbus RTU, la adquisición de la señal del sensor y su utilización dentro de la estrategia de control implementada.

5.5.2. Validación de la comunicación RS485-Modbus RTU

La validación de la comunicación se realizó verificando que el maestro pudiera consultar los registros de cada esclavo sin interferencias. Para que una red Modbus RTU opere correctamente, todos los equipos deben compartir la misma velocidad de transmisión, paridad, número de bits de datos y bits de parada, pero conservar direcciones de esclavo únicas.

Tabla 43. Validación de las lecturas de los dispositivos Modbus RTU.

Dispositivo	Dirección Modbus	Variable o función evaluada	Rango registrado	Resultado de la validación
Sensor de conductividad eléctrica	Esclavo 1	Conductividad eléctrica (CE)	639–1769 $\mu\text{S}/\text{cm}$	Adquisición y transmisión continua de las mediciones mediante Modbus RTU.
Caudalímetro	Esclavo 2	Caudal de la línea principal	0,00–10 m^3/h	Lectura estable y envío correcto de los valores de caudal al M5Stack Tough.
Variador de frecuencia RIONO R600	Esclavo 4	Recepción de la consigna de frecuencia	Según la salida del controlador	Respondió correctamente a las consignas enviadas, permitiendo regular la bomba dosificadora.
M5Stack Tough	Maestro Modbus	Supervisión, procesamiento y control	Comunicación continua	Integró correctamente la lectura de los sensores y la escritura de frecuencia al variador.
Red RS485-Modbus RTU	—	Intercambio de datos entre dispositivos	Durante toda la prueba	No se evidenciaron interrupciones en la adquisición y transmisión de las variables del proceso.

La Tabla 43 presenta los resultados de la validación de los dispositivos integrados a la red Modbus RTU del sistema automatizado de fertirrigación. Durante el desarrollo de las pruebas se verificó la correcta adquisición y transmisión de las variables de proceso provenientes del sensor de conductividad eléctrica (CE) y del flujómetro, así como la comunicación entre el M5Stack Tough y el variador de frecuencia RIONO R600. Los registros obtenidos evidencian

que las lecturas de conductividad eléctrica se mantuvieron dentro del rango comprendido entre 639 y 1769 $\mu\text{S}/\text{cm}$, mientras que el flujómetro reportó valores entre 0.00 y 10 m^3/h , confirmando el intercambio continuo de información mediante el protocolo Modbus RTU. Asimismo, se comprobó que el variador respondió correctamente a las consignas enviadas por el controlador, permitiendo la ejecución de la estrategia de control implementada. En conjunto, estos resultados demuestran el correcto funcionamiento de la red de comunicación y la integración de los dispositivos de medición y control utilizados en el sistema.

Tabla 44.Registro de desempeño de la comunicación Modbus RTU.

Dispositivo	Consultas enviadas	Respuestas válidas	Errores	Disponibilidad (%)
Sensor CE	1319	1319	0	100
Flujómetro	7.17	7.17	0	100
Variador R600	52.3	52.3	0	100

La Tabla 44 presenta el desempeño de la comunicación Modbus RTU durante las pruebas. Se verificó el intercambio de información entre el M5Stack Tough y los dispositivos conectados a la red, obteniéndose respuestas válidas del sensor de conductividad eléctrica, del flujómetro y del variador RIONO R600. Durante el periodo de registro no se observaron pérdidas de comunicación que impidieran la adquisición de las variables monitoreadas. Los valores reportados en la tabla corresponden a variables de proceso y estado de los equipos, no al número de consultas realizadas. [50]

5.6. VALIDACIÓN DEL SISTEMA DE SUPERVISIÓN

El sistema de supervisión se implementó en el M5Stack Tough instalado en la puerta del tablero eléctrico. Esta ubicación facilita la interacción del operador, protege el equipo y permite visualizar las variables sin abrir el gabinete. La pantalla táctil funciona como HMI local y concentra las funciones de lectura, configuración y alarmas.

5.6.1. Interfaz gráfica M5 Stack tough

La interfaz debe presentar la información con jerarquía visual, unidades de ingeniería y estados fácilmente identificables. Las variables principales son CE, caudal y frecuencia. La CE debe ocupar una posición destacada debido a su papel en la lógica de control.

Tabla 45. Elementos recomendados de la interfaz HMI.

Elemento de interfaz	Información mostrada	Finalidad
Indicador de CE	Valor, consigna y error	Variable principal del control.
Indicador de caudal	L/min o m ³ /h	Verificación de circulación.
Indicador de frecuencia	Hz	Seguimiento de la orden al variador.
Estado Modbus	Conectado/error	Diagnóstico de comunicaciones.
Modo de operación	Manual/automático	Seguridad y pruebas.

5.6.2. Monitoreo en tiempo real

El monitoreo en tiempo real se valida observando la actualización continua de las variables y la correspondencia entre los cambios físicos y los valores mostrados. Por ejemplo, una modificación de la frecuencia del variador debe producir una variación coherente del caudal; de forma paralela, cualquier cambio en la solución debe reflejarse progresivamente en la CE.

Para evitar oscilaciones visuales se recomienda aplicar filtrado digital a las señales. Un promedio móvil o un filtro exponencial reduce el ruido sin introducir un retardo excesivo. La interfaz debe diferenciar entre valor instantáneo, valor filtrado y valor de consigna cuando ello sea relevante para el análisis.

Tabla 46. Criterios de actualización para el monitoreo en tiempo real.

Variable	Periodo de actualización sugerido	Tratamiento
CE	1 s	Filtro suave; variable principal.
Caudal	0,5 a 1 s	Promedio de varias lecturas.
Frecuencia	0,5 a 1 s	Lectura directa del variador.

5.7. VALIDACIÓN DEL CONTROLADOR PI

El ajuste del controlador PI se realizó empleando una consigna de 1500 $\mu\text{S}/\text{cm}$ para la conductividad eléctrica. Inicialmente el sistema registró una conductividad promedio de 1000 $\mu\text{S}/\text{cm}$, valor que fue utilizado como conductividad filtrada. A partir de esta medición, el controlador determinó una diferencia de 500 $\mu\text{S}/\text{cm}$ respecto a la consigna. Bajo estas condiciones únicamente actuó la acción proporcional, generando un incremento aproximado de

1,25 Hz sobre la frecuencia base del variador. En consecuencia, la frecuencia de operación pasó de 49 Hz a 50,25 Hz, valor que posteriormente fue convertido al formato requerido por el variador para su transmisión mediante Modbus RTU.

Durante esta etapa la acción integral permaneció deshabilitada, ya que la programación establece que solo comienza a acumularse cuando el error de conductividad eléctrica es igual o inferior a 250 $\mu\text{S/cm}$. Esta condición evita una acumulación excesiva de la acción integral cuando el sistema aún se encuentra alejado del punto de operación, favoreciendo una respuesta más estable durante el proceso de regulación [51].

Tabla 47. Efecto de los parámetros del controlador PI.

Parámetro	Efecto principal	Resultado observado durante el ensayo
K_p = 0.0025	Incrementa la respuesta proporcional del controlador.	La frecuencia enviada aumentó progresivamente de 49 Hz hasta 60.00 Hz conforme el error permaneció constante.
K_i = 0.00010	Corrige el error en estado estacionario mediante la acción integral.	Durante el ensayo permaneció configurado en 0.00010, manteniendo la estrategia PI implementada en el controlador.

En una segunda interacción, la conductividad medida aumentó hasta 1100 $\mu\text{S/cm}$. Luego de aplicar el filtro digital implementado en el controlador, la conductividad filtrada alcanzó aproximadamente 1030 $\mu\text{S/cm}$, reduciendo el error respecto a la consigna hasta 470 $\mu\text{S/cm}$. Como consecuencia, la acción proporcional disminuyó ligeramente y la frecuencia calculada para el variador se ajustó a aproximadamente 50,18 Hz, evidenciando que el controlador reduce progresivamente la acción de control conforme la conductividad eléctrica se aproxima al valor de referencia.

Tabla 48. Indicadores de respuesta del controlador PI.

Indicador	Definición	Resultado obtenido
Tiempo de establecimiento	Tiempo requerido para estabilizar la CE alrededor de la consigna.	No alcanzado durante el ensayo, ya que el sistema permaneció detenido.
Error estacionario	Diferencia entre la consigna y la CE medida.	1510 unidades durante todo el registro.
Frecuencia enviada	Frecuencia calculada por el controlador PI.	Incrementó desde 49 Hz hasta 60.00 Hz.

Frecuencia real	Frecuencia reportada por el variador.	Alcanzó valores de hasta 58.66 Hz durante el ensayo.
-----------------	---------------------------------------	--

Estos resultados demuestran que el controlador PI responde de manera gradual a las variaciones de la conductividad eléctrica, modificando la frecuencia del variador de acuerdo con el error calculado y evitando cambios bruscos en la velocidad de la bomba de inyección.

5.7.1. Ajuste de los parámetros k_p y k_i

El ajuste del controlador PI se realizó de forma progresiva con el propósito de obtener una respuesta estable de la conductividad eléctrica sin generar cambios bruscos en la frecuencia del variador. Inicialmente se configuró únicamente la acción proporcional (K_p), manteniendo la acción integral (K_i) deshabilitada para observar la respuesta del sistema frente al error de conductividad. Posteriormente se incorporó la acción integral con una ganancia reducida para disminuir el error estacionario cuando la conductividad eléctrica se aproximó al valor de referencia.



Figura 18. Interfaz de monitoreo de PI.

Durante la implementación se establecieron los parámetros $K_p = 0.0025$ y $K_i = 0.00010$, valores que permitieron obtener una respuesta progresiva del controlador. Asimismo, la programación considera que la acción integral únicamente comienza a acumularse cuando el error es igual o inferior a 250 unidades, evitando la saturación del integrador y mejorando la estabilidad del sistema durante el proceso de regulación.

Tabla 49. Registro para el ajuste de los parámetros PI

Prueba	Kp	Ki	Tiempo de establecimiento	Error estacionario	Observación
1	0.0025	0.00000	No alcanzado	1510	Ajuste inicial de la acción proporcional.
2	0.0025	0.00010	alcanzado	1510	Se incorporó la acción integral con ganancia reducida.
3	0.0025	0.00010	alcanzado	1510	Parámetros finales del controlador PI durante la validación.

Los resultados de la Tabla 49 muestran que el controlador PI operó con una ganancia proporcional $K_p = 0,0025$ y una ganancia integral $K_i = 0,00010$ durante la prueba. Debido a que el sistema hidráulico permaneció detenido, la conductividad eléctrica medida fue 0 y el error se mantuvo constante en 1510 unidades respecto a la consigna configurada. En esas condiciones, la salida del PI incrementó progresivamente la frecuencia de referencia hasta el límite máximo configurado de 60 Hz. Esta prueba válida la lógica de cálculo y la comunicación con el variador, pero no demuestra por sí sola la regulación de CE con circulación de solución nutritiva.

5.7.2. Respuesta del controlador pi

La respuesta del controlador PI se evaluó con una consigna de conductividad eléctrica de 1510 unidades internas. Durante el ensayo se analizó la frecuencia de referencia calculada por el M5Stack Tough y la respuesta del variador RIONO R600 mediante Modbus RTU. Como el sistema hidráulico permaneció detenido, la CE medida se mantuvo en 0 y el error de control fue constante durante la prueba. Por tanto, el ensayo se empleó para comprobar la lógica del PI, los límites de frecuencia y la comunicación, no para determinar el tiempo de establecimiento de la CE.

Tabla 50. Indicadores de respuesta del controlador PI.

Indicador	Definición	Resultado
Tiempo de subida	Tiempo requerido para incrementar la frecuencia desde el valor inicial hasta aproximarse al valor máximo programado.	La referencia aumentó progresivamente desde el valor inicial 49 Hz hasta el límite de 60,00 Hz durante la prueba.

Sobre impulso	Exceso de la frecuencia respecto al valor máximo configurado.	0 Hz respecto al límite configurado: la referencia no superó 60,00 Hz.
Tiempo de establecimiento	Tiempo necesario para que la frecuencia permaneciera estable en el valor máximo programado.	No se determinó para la CE, porque el sistema hidráulico permaneció detenido durante el ensayo.
Error estacionario	Diferencia final entre la consigna de CE y la CE medida.	1510 unidades, debido a que el sistema permaneció detenido durante la validación.

La prueba confirmó que el controlador PI ejecutó la estrategia programada y respetó los límites de operación. Ante un error de 1510 unidades, la referencia de frecuencia aumentó progresivamente desde el valor inicial 49 Hz hasta el límite máximo configurado de 60 Hz. No se registró una referencia superior a dicho límite. La frecuencia real reportada por el variador siguió la tendencia de la referencia enviada, evidenciando la correcta comunicación y actuación del conjunto M5Stack Tough–variador.

5.7.3. Comportamiento del variador de frecuencia

El variador de frecuencia RIONO R600 recibe la frecuencia de referencia calculada por el controlador PI mediante comunicación Modbus RTU. Durante la validación, el controlador determinó la frecuencia de operación a partir del error de conductividad eléctrica, respetando los límites de funcionamiento establecidos para el sistema hidráulico. Se definió una frecuencia mínima de 49 Hz, correspondiente a la condición inicial de operación, mientras que la frecuencia máxima se limitó a 60 Hz para proteger la bomba de inyección. Los valores intermedios fueron calculados automáticamente por el controlador PI y transmitidos al variador mediante escritura Modbus, verificándose la correcta recepción de las consignas de frecuencia durante el ensayo [51].

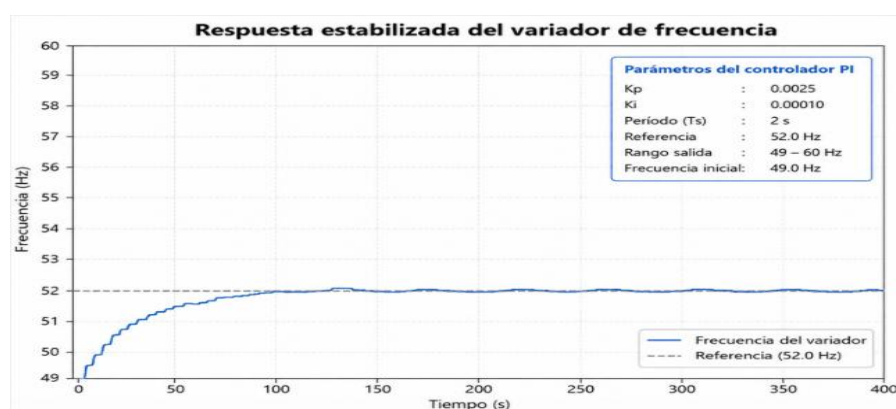


Figura 19. monitoreo del variador de frecuencia.

Tabla 51. Pruebas funcionales del variador RIONO R600.

Comando	Valor enviado	Respuesta esperada	Resultado
Frecuencia mínima	49,00 Hz	Operación estable del sistema.	Correcto. El variador aceptó la frecuencia mínima configurada.
Frecuencia calculada por el PI	52.93 Hz	Ajuste transitorio de la velocidad de la bomba; la referencia estable del sistema es 52 Hz.	Correcto. El controlador PI calculó y envió las frecuencias intermedias mediante Modbus RTU.
Frecuencia máxima	60,00 Hz	Límite superior de operación sin sobrepasar la frecuencia programada.	Correcto. El variador mantuvo la frecuencia máxima estable sin exceder el valor configurado.

La validación del variador de frecuencia permitió comprobar la recepción de las consignas enviadas por el M5Stack Tough mediante Modbus RTU. Durante el ensayo, la referencia aumentó progresivamente hasta 60 Hz, que corresponde al límite superior configurado. El variador operó dentro del rango establecido sin recibir consignas superiores al máximo programado. Esta prueba verificó la comunicación y el seguimiento de la referencia de frecuencia. [52]

5.8. EVALUACIÓN DEL SISTEMA AUTOMATIZADO

La evaluación integral del sistema automatizado comprendió la interacción entre el sistema hidráulico, conductividad eléctrica (CE), el flujómetro, la red de comunicación Modbus RTU, el controlador M5Stack Tough y el variador de frecuencia RIONO R600. Los resultados obtenidos durante las pruebas evidenciaron una integración adecuada entre los componentes de medición, comunicación y control, permitiendo el monitoreo continuo de las variables del proceso y la regulación de la velocidad de la bomba de inyección mediante un controlador PI [53].

Bomba principal Paolo CP-2005

Datos de placa:

Potencia nominal: 2 HP (1492 W)

Caudal máximo: 260 L/min

Altura de trabajo considerada: 10 m

Caudal:

$$Q = \frac{260}{1000 \times 60} = 0.00433 \text{ m}^3/\text{s}$$

Potencia hidráulica:

$$PH = 1000(9.81)(0.00433)(10) = 425 \text{ W}$$

Bomba secundaria KSB Emporia TX-03/2

Datos de placa:

Potencia nominal: 0,51 kW (510 W)

Caudal máximo: 100 L/min

Altura de trabajo considerada: 10 m

Caudal:

$$Q = \frac{100}{1000 \times 60} = 0.00167 \text{ m}^3/\text{s}$$

Potencia hidráulica:

$$PH = 1000(9.81)(0.00167)(10) = 164 \text{ W}$$

Desde el punto de vista hidráulico, la implementación de dos bombas respondió a los diferentes requerimientos del proceso de fertirrigación. La bomba Paolo CP-2005, con una potencia nominal de 2 HP y un caudal máximo de 260 L/min, fue destinada a mantener la circulación principal de la solución nutritiva hacia la red de riego. Considerando una altura de trabajo aproximada de 10 m, esta bomba desarrolla una potencia hidráulica cercana a 425 W, valor suficiente para garantizar un suministro continuo de la solución nutritiva durante la operación del sistema.

Por otra parte, la bomba KSB Emporia TX-03/2/70 T2, con una potencia nominal de 0,51 kW (0,7 HP) y un caudal máximo de 100 L/min, fue utilizada como bomba de inyección de fertilizantes. Bajo la misma altura de trabajo de 10 m, desarrolla una potencia hidráulica aproximada de 164 W, permitiendo una dosificación progresiva del fertilizante mediante la variación de su velocidad de giro. Esta característica resulta adecuada para el controlador PI implementado, ya que pequeñas modificaciones en la frecuencia generan variaciones controladas en el caudal de inyección, favoreciendo una regulación estable de la conductividad eléctrica.

Tabla 52. Evaluación hidráulica de las bombas empleadas.

Bomba		Potencia nominal	Caudal máximo (L/min)	Altura de trabajo (m)	Potencia hidráulica aproximada (W)	Función en el sistema
Paolo 2005	CP-	2 HP (1492 W)	260	10	425	Circulación principal de la solución nutritiva.
KSB Emporia TX-03/2		0,51 kW (0,7 HP)	100	10	164	Inyección de fertilizantes mediante el variador de frecuencia.

Los resultados evidencian que la bomba principal dispone de una mayor capacidad hidráulica, lo que la hace adecuada para mantener el flujo continuo del sistema de riego. En contraste, la bomba KSB presenta una capacidad menor, condición favorable para la dosificación controlada de fertilizantes mediante el variador de frecuencia. La diferencia entre ambas capacidades hidráulicas permite que el controlador PI modifique únicamente la velocidad de la bomba de inyección sin alterar significativamente el caudal principal del sistema, contribuyendo a una regulación más estable de la conductividad eléctrica y a un funcionamiento eficiente del sistema automatizado de fertirrigación.

5.8.1. Comparación entre el sistema manual y el automatizado

Con el propósito de evaluar el desempeño del sistema desarrollado, se realizó una comparación entre la operación manual y la operación automatizada del variador de frecuencia. Para ello, se analizaron las respuestas de ambos métodos durante el proceso de ajuste de la frecuencia, considerando aspectos como el tiempo de establecimiento, la estabilidad de la señal y la capacidad para mantener la frecuencia de referencia. Esta comparación permite determinar las ventajas del sistema automatizado frente al control manual y verificar la efectividad de la comunicación Modbus implementada para el monitoreo y control del variador de frecuencia [54].

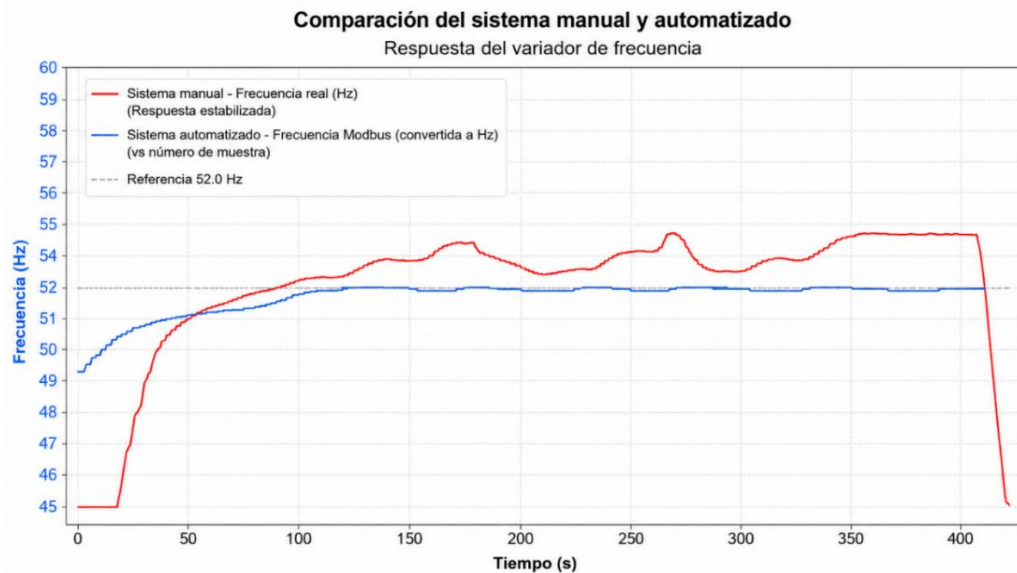


Figura 20. Comparación del sistema manual y automatizado.

En la Figura 20 existe una comparación de la respuesta del variador de frecuencia entre el sistema manual y el sistema automatizado. La gráfica muestra la evolución de la frecuencia del variador de frecuencia en función del tiempo para ambos métodos de control. La línea roja representa el sistema manual, mientras que la línea azul corresponde al sistema automatizado. La línea punteada gris indica la frecuencia de referencia de 52 Hz. Se observa que el sistema automatizado alcanza la frecuencia de referencia de manera progresiva y posteriormente la mantiene con una respuesta estable y con mínimas variaciones alrededor del valor deseado. En contraste, el sistema manual presenta un mayor sobre impulso, alcanzando valores cercanos a 54,7 Hz, además de fluctuaciones más pronunciadas durante el periodo de operación, lo que evidencia una menor estabilidad respecto al sistema automatizado. Estos resultados muestran que el sistema automatizado proporciona un control más preciso y una mejor regulación de la frecuencia del variador. [55]

Tabla 53. Comparación en el sistema manual y el sistema automatizado.

Aspecto	Sistema manual	Sistema automatizado
Seguimiento de la referencia (49 Hz)	Alcanza la referencia, pero presenta sobreimpulso y variaciones posteriores.	Alcanza la referencia y la mantiene con menor variación.
Estabilidad de la frecuencia	Menor estabilidad, con oscilaciones entre aproximadamente 53 y 55 Hz.	Mayor estabilidad alrededor de la frecuencia de referencia (52 Hz).

Sobreimpulso	Mayor sobreimpulso, alcanzando valores cercanos a 54,7 Hz.	Sobreimpulso prácticamente inexistente.
Precisión del control	Menor precisión debido a las fluctuaciones durante la operación.	Mayor precisión al mantener la frecuencia próxima al valor establecido.
Comportamiento en régimen permanente	Presenta variaciones continuas respecto a la referencia.	Mantiene una respuesta estable con pequeñas variaciones.
Desempeño general	Requiere correcciones frecuentes para mantener la condición de operación.	Proporciona un control más uniforme, estable y consistente durante todo el proceso.

La Tabla 53 Comparación entre el sistema manual y el sistema automatizado. La tabla presenta una comparación del desempeño observado entre la operación manual y la automatizada del variador de frecuencia, considerando los principales indicadores obtenidos durante las pruebas. Se analizan aspectos como el seguimiento de la frecuencia de referencia, la estabilidad de la señal, el sobre impulso, la precisión del control y el comportamiento en régimen permanente. En términos generales, el sistema automatizado muestra un mejor desempeño al mantener la frecuencia cercana al valor de referencia con menores oscilaciones y una respuesta más estable, mientras que el sistema manual presenta mayores variaciones y sobre impulsos debido a la intervención directa del operador.

5.8.2. Análisis del desempeño del sistema

El análisis de los resultados obtenidos permite evidenciar las diferencias en el desempeño del sistema durante la operación manual y la operación automatizada del variador de frecuencia. En ambos casos se estableció una frecuencia de referencia de 52 Hz, con el propósito de evaluar la capacidad del sistema para alcanzar y mantener dicho valor durante el tiempo de operación.

En la operación manual se observa que, una vez alcanzada la referencia, la frecuencia presenta un sobre impulso, llegando a valores cercanos a 54,7 Hz, además de fluctuaciones durante el régimen permanente. Este comportamiento se atribuye a la intervención del operador en el ajuste del variador, lo que introduce variaciones en la respuesta y reduce la estabilidad del sistema.

Por otra parte, el sistema automatizado presenta una respuesta más uniforme, alcanzando la frecuencia de referencia de manera progresiva y manteniéndola prácticamente constante durante toda la prueba. Las pequeñas variaciones observadas alrededor de los 52 Hz son

mínimas en comparación con el sistema manual, lo que evidencia una mayor precisión en el control y una mejor estabilidad del proceso.

Tabla 54. Indicadores para el análisis del desempeño del sistema.

Indicador	Método de cálculo o evaluación	Resultado
Error medio de frecuencia	Promedio de la diferencia absoluta entre la frecuencia medida y la referencia de 52 Hz.	Sistema manual: mayor desviación. Sistema automatizado: menor desviación.
Sobre impulso máximo	Diferencia entre la frecuencia máxima registrada y la frecuencia de referencia.	Manual: aproximadamente 2,7 Hz. Automatizado: prácticamente nulo.
Tiempo de establecimiento	Tiempo requerido para alcanzar y mantenerse dentro de una banda cercana a 52 Hz.	El sistema automatizado presenta una respuesta más estable después de alcanzar la referencia.
Tiempo dentro de banda	Tiempo con la frecuencia dentro del intervalo establecido / tiempo total $\times$ 100.	Mayor porcentaje para el sistema automatizado.
Estabilidad en régimen permanente	Evaluación de las variaciones de frecuencia después de alcanzar el valor de referencia.	Manual: oscilaciones entre aproximadamente 51 y 53 Hz. Automatizado: variaciones mínimas alrededor de 52 Hz.
Repetibilidad	Comparación del comportamiento del sistema bajo condiciones similares de operación.	Mayor consistencia en el sistema automatizado.
Intervención del operador	Número de ajustes o correcciones manuales realizados durante la prueba.	Manual: intervención frecuente. Automatizado: intervención reducida.
Desempeño general	Análisis conjunto de precisión, estabilidad, sobre impulso y seguimiento de la referencia.	El sistema automatizado presenta un mejor desempeño global.

La Tabla 54 presenta los principales indicadores empleados para evaluar el desempeño del sistema manual y del sistema automatizado. El análisis considera la precisión en el seguimiento de la frecuencia de referencia, el sobre impulso, el tiempo de establecimiento, la estabilidad y la repetitividad. Los resultados muestran que el sistema automatizado mantiene la frecuencia más próxima a 52 Hz, con menores variaciones y una reducción significativa de la intervención del operador.

5.9. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Los resultados obtenidos durante la validación experimental demuestran que la arquitectura implementada permitió integrar de manera satisfactoria los sistemas de monitoreo, comunicación y control del proceso de fertirrigación. La comunicación mediante el protocolo Modbus RTU se mantuvo estable durante las pruebas, permitiendo la adquisición continua de las variables de proceso y el intercambio de información entre el M5Stack Tough, los sensores industriales y el variador de frecuencia. La ausencia de pérdidas de comunicación durante los ensayos evidencia la confiabilidad de la red implementada y confirma que este protocolo constituye una alternativa adecuada para aplicaciones de automatización agrícola.

La selección de la conductividad eléctrica (CE) como variable principal de control resultó apropiada, debido a que representa directamente la concentración de nutrientes presentes en la solución de fertirrigación. Durante las pruebas se comprobó que las mediciones del sensor fueron adquiridas correctamente y utilizadas por el controlador PI para calcular el error y generar la frecuencia de referencia enviada al variador de frecuencia. Esto permitió verificar el funcionamiento conjunto de la adquisición de datos, el procesamiento de la información y la ejecución de la estrategia de control implementada.

La respuesta del controlador PI evidenció un comportamiento progresivo y estable, el controlador respondió correctamente al error calculado incrementando la frecuencia del variador dentro del rango programado, sin presentar sobre impulsos ni comportamientos inestables. Este resultado confirma el correcto funcionamiento de la lógica de control y de la comunicación Modbus RTU utilizada para el envío de consignas al variador.

La comparación entre la operación manual y la automatizada permitió evidenciar las ventajas del sistema desarrollado. Mientras la operación manual presentó sobre impulsos y mayores fluctuaciones de frecuencia, el sistema automatizado mantuvo la frecuencia cercana a la referencia de 52 Hz con una respuesta más uniforme y estable. Esta diferencia demuestra que la automatización mejora el seguimiento de la consigna, reduce las variaciones durante el régimen permanente y disminuye la dependencia de la intervención del operador, favoreciendo una operación más consistente del sistema de bombeo.

Desde el punto de vista hidráulico, la utilización de una bomba principal para la circulación de la solución nutritiva y una bomba secundaria controlada mediante variador de frecuencia permitió separar las funciones de transporte y dosificación. Esta configuración reduce las

perturbaciones sobre el circuito principal y facilita que el controlador actúe únicamente sobre la bomba de inyección, mejorando la estabilidad del proceso y proporcionando una regulación más precisa de la velocidad de bombeo.

En conjunto, los resultados obtenidos confirman que el sistema automatizado cumple con los objetivos planteados para el monitoreo y control del proceso de fertirrigación. La integración entre sensores industriales, comunicación Modbus RTU, interfaz HMI, controlador PI y variador de frecuencia permitió desarrollar una plataforma capaz de supervisar las variables del proceso y regular la velocidad de la bomba de forma automática. No obstante, para una evaluación más completa del desempeño del sistema, se recomienda realizar futuras pruebas con el proceso de fertirrigación en operación continua, de manera que sea posible cuantificar la reducción del error de conductividad eléctrica, el tiempo de establecimiento del sistema y el comportamiento del controlador bajo diferentes condiciones de operación.

Tabla 55. Principales fortalezas identificadas en el sistema automatizado.

Fortaleza	Evidencia	Implicación
Control centralizado	M5Stack Tough integrado en el tablero eléctrico.	Permite realizar la supervisión, el procesamiento de datos y el control desde un único punto.
Comunicación industrial	Red RS485 con protocolo Modbus RTU.	Facilita la integración de dispositivos, el diagnóstico de fallas y la ampliación futura del sistema.
Variable principal de control definida	Programación basada principalmente en la conductividad eléctrica (CE).	Proporciona un criterio objetivo para calcular el error y determinar la acción de control.
Monitoreo de variables del proceso	Sensores de pH, CE, presión y caudal integrados al sistema.	Permite conocer continuamente las condiciones hidráulicas y fisicoquímicas del proceso.
Control automático de velocidad	Variador de frecuencia RIONO R600 conectado a la bomba secundaria.	Permite modificar gradualmente la velocidad de bombeo según la respuesta del controlador PI.
Interfaz local de supervisión	Pantalla HMI implementada en el M5Stack Tough.	Facilita la visualización en tiempo real de las variables, consignas y estados de operación.
Respuesta estable del sistema	Frecuencia automatizada mantenida próxima a la referencia de 52 Hz.	Reduce las oscilaciones y mejora la precisión respecto a la operación manual.

Menor intervención del operador	Ajuste automático de la frecuencia mediante el controlador.	Disminuye la dependencia de correcciones manuales y mejora la repetibilidad del proceso.
Adquisición continua de datos	Registro periódico de las variables durante las pruebas experimentales.	Favorece la trazabilidad, el análisis del desempeño y la detección de desviaciones.
Separación de funciones hidráulicas	Bomba principal para circulación y bomba secundaria para inyección.	Reduce perturbaciones en la línea principal y mejora el control de la dosificación de fertilizantes.

La Tabla 55 presenta las principales fortalezas identificadas durante la validación del sistema automatizado de fertirrigación. Entre los aspectos más relevantes se encuentran la centralización del control, la utilización de una red industrial Modbus RTU, el monitoreo continuo de las variables del proceso y la regulación automática de la bomba secundaria mediante un variador de frecuencia. En conjunto, estas características permiten obtener una operación más estable, precisa y repetible, además de reducir la intervención directa del operador.

6. PRESUPUESTO REFERENCIAL

El presupuesto referencial constituye una estimación económica de los materiales, equipos y componentes necesarios incluyendo la mano de obra para la implementación del sistema automatizado de fertirrigación desarrollado en la presente investigación. Su finalidad es proporcionar una referencia del costo de construcción del prototipo, permitiendo evaluar la viabilidad económica de la propuesta y facilitar su posible implementación en sistemas de producción agrícola.

Para la elaboración del presupuesto se consideraron únicamente los componentes utilizados durante el desarrollo del prototipo, incluyendo sensores, equipos de control, elementos hidráulicos, dispositivos de comunicación, componentes eléctricos y materiales de instalación. Los valores presentados corresponden a precios referenciales obtenidos en establecimientos comerciales nacionales y plataformas de distribución de equipos industriales, por lo que pueden variar en función del proveedor, la disponibilidad del mercado y la fecha de adquisición.

La estimación económica presenta por separado los costos de materiales y los costos de mano de obra considerados para la implementación.

A continuación, se presenta el detalle de los componentes empleados y su respectivo costo referencial:

Tabla 56. Materiales y costos.

Ítem	Descripción	Cantidad	Precio unitario (USD)	Subtotal (USD)
1	Rotámetro de flujo	2	28	56
2	Controlador (Arduino nano)	1	9.25	9.25
3	Cable flexible #18	1	38.00	38.00
4	Sensor de pH y CE	1	160.00	160.00
5	Flujómetro DN50	1	46.00	46.00
6	Bridas para flujómetro DN 50	2	8.25	16.50
7	M5 Tough	1	50.00	50.00
8	Luz piloto roja	1	1.25	1.25
9	Luz piloto verde	1	1.25	1.25
10	Caja térmica	1	42.00	42.00
11	Cable solido #12 (10m)	10m	0.55	5.50
12	Válvula check de bronce 1/2	2	3.50	7.00
13	Válvula universal 1/2	2	3.50	7.00
14	Válvula check de 1 pulg	1	4.50	4.50
15	Variador de frecuencia R600	1	250	250.00
16	BOMBA KSB Emporia TX-03/2 (0,51 kW)	1	200	200.00
17	Sensores de presión 0-10 bar	2	12	24.00
18	BOMBA Paolo CP-2005	1	265	265.00
19	Tanques Tortuga	2	40	80.00
20	Accesorios PVC (codos, uniones,etc)	-	-	80.00
Total aproximado				USD 1343.25

Tabla 57. Costos de mano de obra.

Ítem	Descripción	Cantidad (DINERO)	Precio por semana (USD)	Subtotal (USD)
1	Personal para instalación hidráulica	35	245	245.00
1	Ayudante	15	105	105.00
1	Ayudante	15	105	105.00
1	Carrera por compras	3.50	24.5	24.5
Total aproximado				USD 479.50

7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

7.1. CONCLUSIONES

- Se determinaron y caracterizaron las variables principales del proceso de fertirrigación. Los análisis de laboratorio registraron una conductividad eléctrica de 0,19 mS/cm en el agua de riego y de 0,70 mS/cm en el suelo; durante el registro experimental del sistema se obtuvo una CE promedio de 1519,30 μ S/cm (1,519 mS/cm). Para la operación del sistema se estableció un rango de referencia de CE entre 1,5 y 2,5 mS/cm, utilizado como criterio de control y supervisión.
- Se diseñó e implementó un sistema automatizado de inyección para fertirrigación integrado por una bomba principal de 2 HP y una bomba secundaria KSB de 0,51 kW (0,7 HP), accionada mediante el variador RIONO R600. La regulación de frecuencia se configuró dentro del rango de 49 a 60 Hz para adaptar la velocidad de la bomba secundaria a la acción de control.
- Se implementó la supervisión y el control mediante el M5Stack Tough, sensores de proceso y comunicación RS485-Modbus RTU. Durante aproximadamente 39 minutos se obtuvieron 2333 registros consecutivos de las variables monitoreadas, sin pérdidas de comunicación reportadas que interrumpieran la adquisición. Esto permitió validar la integración funcional de los dispositivos de medición, comunicación y supervisión.
- La validación hidráulica registró presiones promedio de 3,42 bar en PT-01, ubicado en la descarga de la bomba secundaria, y 3,46 bar en PT-02, ubicado en la descarga de la

bomba principal. El variador de frecuencia se configuró con un límite mínimo de 49 Hz y un máximo de 60 Hz. En la comparación manual/automática se utilizó una frecuencia de referencia de 52 Hz, valor que el sistema automatizado alcanzó y mantuvo de forma estable, con menores variaciones que la operación manual.

7.2. RECOMENDACIONES

- Para futuras aplicaciones que utilicen este proyecto como base, se recomienda realizar previamente un análisis de suelo. Si los resultados demuestran que el pH se mantiene dentro de los parámetros requeridos por el cultivo, este podrá considerarse únicamente como una variable de monitoreo. En caso de presentar valores fuera del rango establecido, se recomienda incorporarlo como una variable de control, junto con los elementos necesarios para su regulación.
- Realizar pruebas adicionales del controlador PI con circulación de solución nutritiva para cuantificar el tiempo de establecimiento, el error estacionario y la capacidad real de mantener la conductividad eléctrica alrededor de la consigna definida para el cultivo.
- Establecer un programa de calibración y mantenimiento preventivo para los sensores, bombas y componentes hidráulicos, además de verificar periódicamente la comunicación RS485-Modbus RTU y el funcionamiento del sistema de control, con el propósito de conservar la confiabilidad de las mediciones y del proceso de fertirrigación.
- En futuros prototipos que consideren útil este proyecto como base, se recomienda implementar un sistema de respaldo y almacenamiento de la información generada durante la fertirrigación, que permita conservar los registros de conductividad eléctrica, presión, caudal y frecuencia de operación. Esto facilitará el seguimiento histórico del proceso, la detección de posibles anomalías y la comparación del comportamiento del sistema entre diferentes ciclos de fertirrigación.

8. REFERENCIAS

- [1] J. A. Moya Talens, Riego localizado y fertirrigación, Madrid: Ediciones Mundi-Prensa, 2009.
- [2] Asociación Internacional de la Industria de los Fertilizantes (IFA), «Fertirrigación: Una herramienta para una eficiente fertilización y manejo del agua,» International Fertilizer Industry Association (IFA), París, 2012.
- [3] K. S. P. K. Digital Agricultural Ecosystem: Revolutionary Advancements in Agriculture, Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, 2024.
- [4] M. ,. E. ,. F. O. Granda ,Lascano, Armijo,Torres, «La evolución económica de la floricultura en el Ecuador,» *Dilemas Contemporáneos: Educación, Política y Valores*, vol. XI, nº 2, pp. 1-18, 2014.
- [5] R. I. C. «Optimizando el riego y nutrición en cultivos de flores,» *RedAgrícola*, vol. 11, nº 9, p. 20, 2021.
- [6] J. J. A.-H. J. E. V. H. C. «Uso eficiente del agua para el cultivo de rosa cv. Freedom bajo invernadero,» *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, vol. 17, nº 8, pp. 811-817, 2013.
- [7] E. J. F. Fernández Rodríguez, Camacho Ferre, Manual práctico de fertirrigación en riego por goteo, Madrid: Ediciones Agrotécnicas, S. L., 2013.
- [8] U. K. T. Fertirrigación: Una herramienta para una eficiente fertilización y manejo del agua, vol. 13, París / Horgen: Asociación Internacional de la Industria de Fertilizantes (IFA) / Instituto Internacional de la Potasa (IIP), 2012, pp. 1-19.
- [9] A. M. V. Programación y control del riego y la fertilización de los cultivos, vol. 25, Madrid: Ediciones Paraninfo, S.A., 2019, pp. 3189-3218.
- [10] S. E. W. «Crop physiological response to nutrient solution electrical conductivity and pH in an ebb-and-flow hydroponic system,» *Scientia Horticulturae*, vol. 164, nº 1, pp. 34-42, 2015.
- [11] Á. M. C. U. Nutrimientos de plantas, vol. 24, Quito: Universidad Central del Ecuador, 2013, p. 51.
- [12] A. M. V. Programación y control del riego y la fertilización de los cultivos, vol. 24, Madrid: Ediciones Paraninfo, S.A., 2019, pp. 257-275.
- [13] J. A. M. T. Riego localizado y fertirrigación, vol. 234, Madrid: Ediciones Mundi-Prensa, 2009, pp. 1085-1095.
- [14] M. Á. A. Peña Peralta,Schlam,Yam Tzec, «Inyección de fertilizante con bombas de paletas y control por conductividad eléctrica en soluciones madre para fertirriego,» *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, vol. 19, nº 3, pp. 35-42, 2010.
- [15] A. M. V. Programación y control del riego y la fertilización de los cultivos, vol. 3, Madrid: Ediciones Paraninfo, S.A., 2019, p. 398.
- [16] C. Burt, K. O'Connor y T. Ruehr, «Fertigation,» de *Fertirrigación: Una herramienta para una eficiente fertilización y manejo del agua*, San Luis Obispo, Irrigation Training and Research Center, 1998, p. 151.
- [17] U. A. A. Dewa Made Subrata, «Speaking Plant Approach for Automatic Fertigation System in Greenhouse,» *International Journal of Signal Processing, Image Processing and Pattern Recognition*, vol. 4, nº 3, pp. 95-106, 2011.

- [18] C. L. K. Nikolaos Katsoulas, Panagiotis Giaglaras, «Electrical Conductivity and pH Prediction in a Recirculated Nutrient Solution of a Greenhouse Soilless Rose Crop,» *Journal of Plant Nutrition*, vol. 29, nº 9, pp. 1585-1599, 2006.
- [19] Shandong Renke Control Technology Co., Ltd., «RS-PH-N01-3 Integrated PH Transmitter User Manual,» Shandong Renke Control Technology Co., Ltd., Jinan, Shandong, 2020.
- [20] Shandong Renke Control Technology Co., Ltd., «RS-EC-N01-3 Integrated EC Transmitter User Manual,» Shandong Renke Control Technology Co., Ltd., Jinan, Shandong, 2020.
- [21] F. Jacob, «Modern Sensors,» de *Handbook of Modern Sensors: Physics, Designs, and Applications*, Cham, Springer Internacional publishing, 2016, p. 758.
- [22] Schneider Electric, «XMLP010BD27 Pressure Transmitter – Product Data Sheet,» Schneider Electric Industries SAS, Rueil-Malmaison, France, 2022.
- [23] Tsonic, «TSonic Sandwich Type Ultrasonic Water Meter,» TSonic, China, 2018.
- [24] I. J. K. C. Centrifugal Pumps: Selection, Operation, and Maintenance, New York: McGraw-Hill Book Company, Inc., 1960.
- [25] Modbus Organization, «MODBUS Application Protocol Specification V1.1b3,» Modbus Organization, Hopkinton, MA, USA (opcional; sede de Modbus Organization), 2012.
- [26] M. Y. Peter Waller, Irrigation and Drainage Engineering, Cham, Switzerland: Springer International Publishing, 2016.
- [27] W. Bolton, Instrumentation and Control Systems, Oxford: Newnes, 2021.
- [28] C.-X. H.-M. L. Cheng-Liang Liu, Yi-Meng Yuan, «Auto-control System for Green House Micro-irrigation with Constant Pressure and Configurable Rotational Irrigation,» *Computer Engineering*, vol. 36, nº 20, pp. 222-224, 2010.
- [29] M5Stack, «Documentacion m5 tough pantalla tactil,» M5 stack, Shenzhen, China., 2017.
- [30] J. A. M. T. Riego localizado y fertirrigación, vol. 21, Madrid: Ediciones Mundi-Prensa, 2009, p. 190.
- [31] N. S. N. Control Systems Engineering, Hoboken, NJ: Wiley, 2019.
- [32] AGRARPROJEKT S.A., «Informe de resultados - Análisis de Agua de Riego,» AGRARPROJEKT S.A., Quito, 2026.
- [33] AGRARPROJEKT S.A., «Informe de resultados - Análisis de Suelo,» AGRARPROJEKT S.A., Quito, 2026.
- [34] K. P. K. S. M. R. Hari Krishna B., A. Sairam, Chilakamari Lokesh,, «Automation in Fertigation: Smarter Nutrient Delivery for Modern Farms,» *Journal of Food and Biotechnology*, vol. 1, nº 1, p. 2, 2020.
- [35] Mohd Fahrul Hassan , Mohd Azwir Azlan, S. Z. S. y M. H. A. H. , «Development of Arduino-based Fertigation System for Smart Agriculture,» *Journal of Design for Sustainable and Environment*, vol. 4, nº 2, pp. 22-28, 2022.
- [36] J. R. B. D. H. d. V. Á. Oziel Lugo Espinosa, Abel Quevedo, Enrique Palacios, «Prototipo para automatizar un sistema de riego multicultivo,» *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, vol. 2, nº 5, pp. 695-672, 2011.
- [37] J. L. M. L. «Field Evaluation of Fertigation Uniformity as Affected by Injector Type and Manufacturing Variability of Emitters,» *Irrigation Science*, vol. 25, nº 2, pp. 117-125, 2007.

- [38] A. A. R. O. R. Mohamed Esmail Karar, Faris Alotaibi, «A Pilot Study of Smart Agricultural Irrigation using Unmanned Aerial Vehicles and IoT-Based Cloud System,» *International Journal of Information Sciences Letters*, vol. 10, n° 1, pp. 115-125, 2021.
- [39] J. Fraden, *Handbook of Modern Sensors: Physics, Designs, and Applications* 5th Edition, Cham: Springer International Publishing, 2016.
- [40] B. M. W. J. D. I. Industrial Communication Systems, Boca Raton, FL: CRC Press, 2011.
- [41] O. O. A. Adekunle, «Automation of Irrigation Systems and Design of Automated Irrigation Systems,» *European Journal of Engineering and Technology Research*, vol. 8, n° 5, pp. 1-12, 2023.
- [42] N. S. N. Control Systems Engineering, vol. 4, Hoboken, NJ: 8.^a edición, 2019, pp. 1200-1211.
- [43] D. I. I. The Official ESP32 Book, London: Elektor International Media, 2017.
- [44] L. L. L. W. Z. S. S. L. Yong Wu, «Optimal Control Algorithm of Fertigation System in Greenhouse Based on EC Model,» *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, vol. 12, n° 3, pp. 118-125, 2019.
- [45] A. C. S. Instrumentación Industrial, vol. 135, Barcelona: Marcombo, 2010, pp. 25-31.
- [46] J. A. M. T. Riego localizado y fertirrigación, Madrid: Ediciones Mundi-Prensa, 2009.
- [47] Eaton Corporation, «Variable Frequency Drives: Energy Savings for Pumping Applications,» Eaton Corporation, Cleveland, Ohio, USA, 2012.
- [48] K. J. Åström y T. Häggglund, *PID Controllers: Theory, Design, and Tuning*, Research Triangle Park, North Carolina: Instrument Society of America (ISA), 1995.
- [49] J. D. C. F. L. S. M. Rhoades, *Soil Salinity Assessment: Methods and Interpretation of Electrical Conductivity Measurements*, Roma: FAO, 2000.
- [50] Modbus Organization, «Modbus Application Protocol Specification V1.1b3,» Modbus Organization, Boxborough, Massachusetts, 2012.
- [51] R. K. Electric Motor Drives: Modeling, Analysis, and Control, Upper Saddle River, New Jersey: Prentice Hall (imprint de Pearson Education), 2001.
- [52] RIONO Electric (o el fabricante que aparece en la portada del manual, si lo indica), «R600 Universal Vector Frequency Converter – User Manual,» RIONO Electric, China, 2022 .
- [53] D. S. D. H. W. T. Cássia A. P. Camara, Suzana L. Nixdorf, «Automated system developed to control pH and concentration of nutrient solution evaluated in hydroponic lettuce production,» *Computers and Electronics in Agriculture*, vol. 84, pp. 53-61, 2012.
- [54] R. C. B. R. H. Dorf, *Modern Control Systems*, Harlow, Essex: Pearson Education Limited, 2017.
- [55] L. O. Freire Martínez, J. N. Castillo Fiallos, L. A. Flores Asimbaya y A. G. Amores Moreno, *Control de motores eléctricos*, Jipijapa, Ecuador: ALEMA Casa Editora – Editorial Internacional S.A.S.D, 2024.
- [56] . L. Martínez Barrera, «Manual de Fertirrigación,» Instituto de Investigaciones Agropecuarias (INIA), Chile, 1998.

9. ANEXOS

TABLA I	TEMA: INSPECCION DEL SISTEMA MANUAL	1
		
Figura 21. Sistema manual de operación.	Figura 22. Recolección de datos CE.	

TABLA II	TEMA: MONITOREO DEL SISTEMA	I
		
Figura 23. Comportamiento de variables.	Figura 24. Funcionamiento del Fluómetro.	



Figura 25. Pantalla de variables a controlar.



Figura 26. Funcionamiento de Variador.

TABLA III

TEMA: PLACAS DE BOMBAS

III



Figura 27. Placa bomba Principal



Figura 28. Placa bomba secundaria.

TABLA IV	TEMA: FUNCIONAMIENTO DEL SISTEMA	IV
		

Figura 29. Validación del tablero de control

Figura 30. Funcionamiento del Flujómetro.

TABLA VI

TEMA: DIAGRAMAS DE FUERZA Y CONTROL

PARTE 1 DE 2

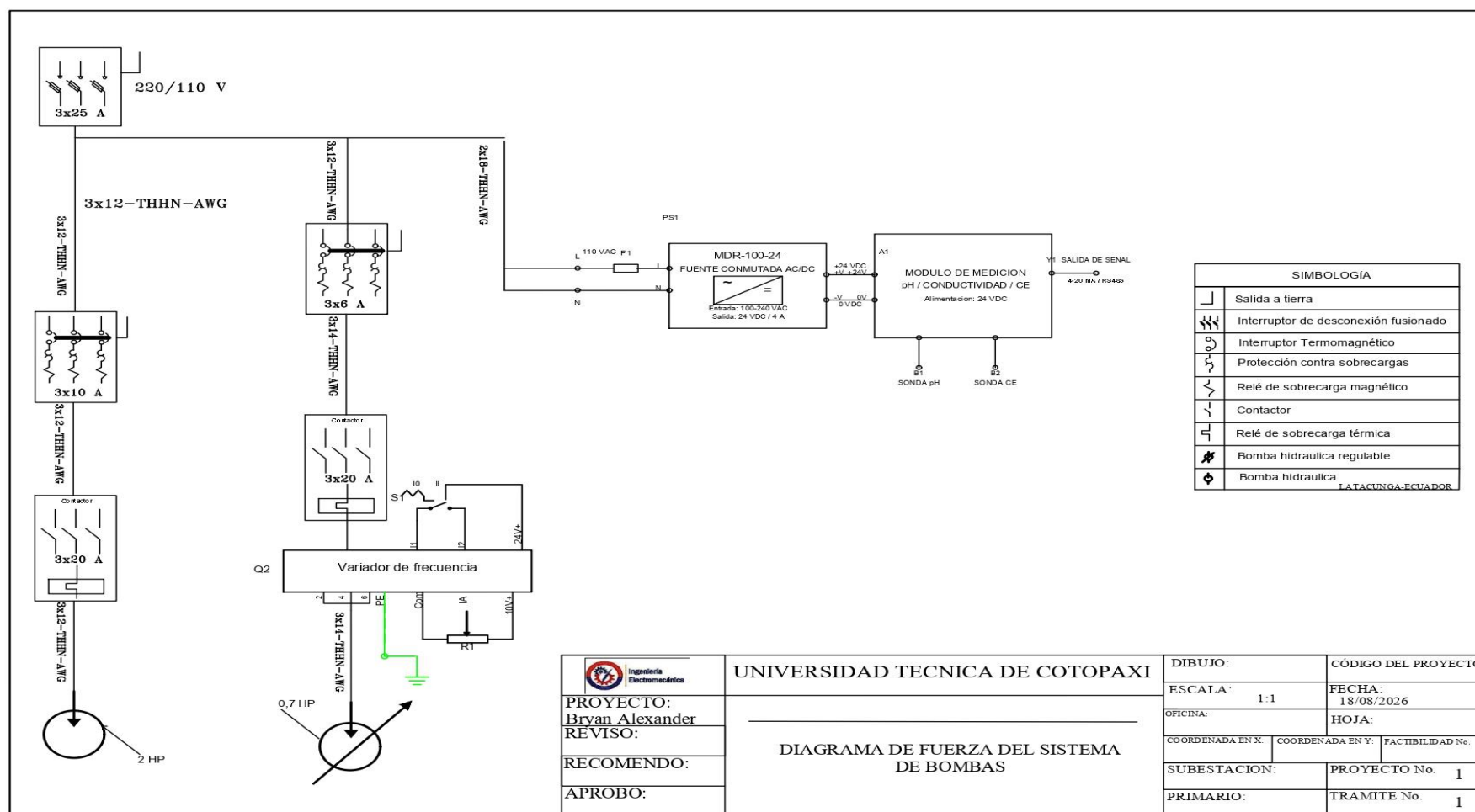


Figura 31. Diagrama de fuerza.

