



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

**TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL
TÍTULO DE INGENIERO INDUSTRIAL**

**” SIMULACIÓN DE SISTEMA DE RIEGO AUTOMATIZADO A
PARTIR DE INGENIERÍA DE MÉTODOS Y MEDICIÓN DEL
TRABAJO PARA LA FLORÍCOLA FALCON FARMS ”**



AUTOR: Javier Alexander Goveo Torres
DIRECTOR: Ing. Víctor Alfonso Erazo Arteaga, MSc.

Ibarra – Ecuador
2026

IDENTIFICACIÓN DE LA OBRA

La Universidad Técnica del Norte dentro del proyecto Repositorio Digital Institucional, determinó la necesidad de disponer de textos completos en formato digital con la finalidad de apoyar los procesos de investigación, docencia y extensión de la Universidad.

Por medio del presente documento dejo sentada mi voluntad de participar en este proyecto, para lo cual pongo a disposición la siguiente información:

DATOS DE CONTACTO			
CÉDULA DE IDENTIDAD:	1004296628		
APELLIDOS Y NOMBRES:	Goveo Torres Javier Alexander		
DIRECCIÓN:	Imbabura, Atuntaqui, San Roque		
EMAIL:	jagoveot@utn.edu.ec		
TELÉFONO FIJO:	0983616495	TELF. MOVIL	0983616495

DATOS DE LA OBRA	
TÍTULO:	Simulación de sistema de riego automatizado a partir de ingeniería de métodos y medición del trabajo para la florícola Falcon Farms.
AUTOR (ES):	Goveo Torres Javier Alexander
FECHA: AAAAMMDD	03/03/2026
SOLO PARA TRABAJOS DE INTEGRACIÓN CURRICULAR	
CARRERA/PROGRAMA:	☒ GRADO ☐ POSGRADO
TITULO POR EL QUE OPTA:	Ingeniero Industrial
DIRECTOR:	Ing. Víctor Alfonso Erazo Arteaga MSc.

AUTORIZACIÓN DE USO A FAVOR DE LA UNIVERSIDAD

Yo, Javier Alexander Goveo Torres , con cédula de identidad Nro. 1004296628 , en calidad de autor (es) y titular (es) de los derechos patrimoniales de la obra o trabajo de integración curricular descrito anteriormente, hago entrega del ejemplar respectivo en formato digital y autorizo a la Universidad Técnica del Norte, la publicación de la obra en el Repositorio Digital Institucional y uso del archivo digital en la Biblioteca de la Universidad con fines académicos, para ampliar la disponibilidad del material y como apoyo a la educación, investigación y extensión; en concordancia con la Ley de Educación Superior Artículo 144.

Ibarra, a los 03 días del mes de marzo de 2026.

EL AUTOR:

Firma

Nombre Javier Alexander Goveo Torres

CONSTANCIAS

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

Ibarra, a los 03 días del mes de marzo de 2026.

EL AUTOR:

Firma

Nombre Javier Alexander Goveo Torres

CERTIFICACIÓN DEL DIRECTOR DEL TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR

Ibarra, 03 de marzo de 2026.

Ing. Víctor Alfonso Erazo Arteaga, MSc.

DIRECTOR DEL TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR

CERTIFICA:

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

Ing. Víctor Alfonso Erazo Arteaga, MSc.

C.C: 1719188029

APROBACIÓN DEL COMITÉ CALIFICADOR

El Comité Calificado del trabajo de Integración Curricular “ SIMULACIÓN DE SISTEMA DE RIEGO AUTOMATIZADO A PARTIR DE INGENIERÍA DE MÉTODOS Y MEDICIÓN DEL TRABAJO PARA LA FLORÍCOLA FALCON FARMS ” elaborado por Javier Alexander Goveo Torres , previo a la obtención del título del Ingeniero Industrial , aprueba el presente informe de investigación en nombre de la Universidad Técnica del Norte:

Ing. Victor Alfonso Erazo Arteaga, MSc.

C.C: 1719188029

PhD. Robert Mauricio Valencia Chapi

C.C: 1003134879

DEDICATORIA

Dedico este logro a Dios, por brindarme la fortaleza, sabiduría y perseverancia necesarias para culminar esta etapa tan importante de mi formación.

A mis padres, por su apoyo incondicional, sus consejos y sacrificios constantes, que han sido el pilar fundamental para alcanzar este logro.

A mis compañeros, quienes con su motivación y confianza me impulsaron a no rendirme ante las dificultades.

Finalmente, a todos aquellos que contribuyeron de manera directa e indirecta en mi formación profesional a lo largo de los años.

Javier Alexander Goveo Torres

AGRADECIMIENTO

Expreso mi más sincero agradecimiento a la Universidad Técnica del Norte, por brindarme la oportunidad de formarme académica y profesionalmente en sus aulas, permitiéndome adquirir los conocimientos y valores necesarios para mi desarrollo integral.

A mis padres y hermanos, por su apoyo incondicional, comprensión y motivación constante a lo largo de esta etapa, siendo el pilar fundamental en cada logro alcanzado.

De igual manera, agradezco a los docentes que contribuyeron en mi formación académica y personal, quienes con su enseñanza, ejemplo y dedicación me han ayudado a convertirme en la persona que soy hoy.

Un agradecimiento especial a mi tutor MSc. Víctor Alfonso Erazo Arteaga, y a mi asesor PhD. Robert Mauricio Valencia Chapi, quienes me han brindado no solo conocimiento y valores, sino también su guía, apoyo técnico y orientación académica durante el desarrollo del presente proyecto de investigación.

Javier Alexander Goveo Torres

ÍNDICE DE CONTENIDOS

DEDICATORIA	7
AGRADECIMIENTO	8
ÍNDICE DE FIGURAS	16
ÍNDICE DE TABLAS	17
RESUMEN	21
ABSTRACT	22
CAPÍTULO I	
1.1 Planteamiento del Problema	23
1.2 Objetivos	24
1.2.1 Objetivo General	24
1.2.2 Objetivos Específicos	24
1.3 Alcance y delimitación	25
1.4 Justificación	25
CAPÍTULO II	
2.1 Cultivo de rosas:	27
2.2 Sistemas de Riego	28
2.2.1 Tipos de sistemas de riego.	28
2.3 Automatización Industrial	30
2.3.1 Automatización en el sector agrícola	31
2.4 Medición del trabajo	31
2.5 Ingeniería de métodos	31
2.6 Simulación de sistemas productivos	32

2.7	Diseño de sistemas de distribución de agua	32
2.7.1	Riego localizado	33
2.7.2	Fuente de abastecimiento	33
2.7.3	Cabezal del riego.	33
2.7.3.1	Sistemas de filtrado	34
2.7.4	Equipos de fertirrigación.	34
2.7.5	Componentes.	35
2.7.6	Eficiencia energética en sistemas de distribución de aguas	36
2.7.7	Pérdidas de carga por fricción.	37
2.7.8	Pérdidas de cargas en accesorios.	38
2.7.9	Presión mínima requerida	39
2.7.10	Altura geodésica	40
2.7.11	Requerimiento de altura total	40
2.8	Sistemas de bombas en serie	41
2.9	Cavitación	42
2.10	Velocidad de flujo para sistemas hidráulicos	43

2.11 Ecuaciones utilizadas por SolidWorks Flow Simulation	43
2.11.0.1 Ecuación de conservación de la masa	44
2.11.0.2 Ecuación de conservación de la cantidad de movimiento	44
2.11.0.3 Ecuación de conservación de la energía.	45
CAPÍTULO III	
3.1 Contexto de la empresa	46
3.1.1 Historia	46
3.1.2 Datos generales:	47
3.1.3 Localización:	47
3.2 Direccionamiento estratégico	48
3.2.1 Misión:	48
3.2.1.1 Visión	48
3.2.1.2 Organigrama.	49
3.3 Tipo de investigación	50
3.3.1 Investigación documental:	50
3.3.2 Investigación de campo:	50
3.3.2.1 Técnicas de investigación:	51
3.4 DISEÑO DE INGENIERÍA	52
3.5 Análisis QFD	52
3.6 Selección de alternativas	53
3.7 Análisis CFD	53
3.8 Diseño de la propuesta	54

CAPÍTULO IV

4.1	Ingeniería de métodos y medición del trabajo	55
4.1.1	Diagrama de recorrido actual	55
4.1.2	Diagrama de procesos	57
4.1.3	Cursograma analítico actual	57
4.1.4	Diagrama Hombre-Máquina actual.	59
4.2	Distribución Actual	59
4.3	Diagnóstico del sistema	61
4.3.1	Condiciones de operación	61
4.3.2	Geometría de la red analizada	61
4.3.3	Pérdidas de carga por fricción.	62
4.3.4	Perdidas menores.	63
4.3.5	Presión mínima y altura geodésica	63
4.3.6	Altura dinámica total.	64
4.3.7	Mediciones en campo	64
4.3.8	Diagnóstico	65
4.4	Diseño de la propuesta	66
4.4.1	Requerimientos de la empresa.	66
4.4.2	Voz del cliente:	67
4.4.3	Vos del ingeniero:	67
4.5	Selección de alternativas	69
4.5.1	Diagramas funcionales	69
4.6	Análisis modular	72

4.6.1	Módulo 1: Control de riego.	72
4.6.1.1	Análisis de funciones módulo 1	72
4.6.1.2	Análisis de soluciones módulo 1	77
4.6.1.3	Evaluación y selección de alternativas.	78
4.6.2	Módulo 2: Fertilización.	84
4.6.2.1	Análisis de funciones Módulo 2.	84
4.6.2.2	Alternativas de solución Módulo 2	88
4.6.2.3	Evaluación y selección de alternativas Módulo 2	88
4.6.3	Módulo 3: Filtración	95
4.6.3.1	Análisis de funciones módulo 3	95
4.6.3.2	Alternativas de solución módulo 3.	99
4.6.3.3	Evaluación y Selección de Alternativas Módulo 3	99
4.6.4	Módulo 4: Distribución del agua.	105
4.6.4.1	Análisis de funciones módulo 4	105
4.6.4.2	Alternativas de solución módulo 4.	110
4.6.4.3	Evaluación y Selección de Alternativas Módulo 4	110
4.6.5	Propuesta de diseño del sistema de riego	115
4.6.5.1	Diseño mecánico del sistema	115
4.6.5.2	Diseño del sistema eléctrico y de control.	116
4.7	Análisis CFD.	116

4.7.1	Análisis en el punto (P1)	117
4.7.2	Análisis en el punto (P2)	118
4.7.3	Análisis en el punto (P3)	119
4.7.4	Determinación del punto crítico del sistema	120
4.7.5	Validación del modelo de simulación	121
4.7.6	Definición del punto de intervención para la propuesta	123
4.7.6.1	Configuración del sistema propuesto	123
4.7.6.2	Variación de condiciones de frontera	124
4.7.6.3	Resultados obtenidos de las simulaciones	124
4.8	Selección de bomba centrífuga	126
4.8.1	Análisis bombas existentes	127
4.9	Análisis de costos	130

4.9.1	Retorno de la inversión	130
4.9.2	Datos de partida.	130
4.9.3	Cálculo de ingresos anuales actuales	131
4.9.4	Beneficios de la implementación	131
4.9.4.1	Recuperación de producción	131
4.9.4.2	Ahorros operativos	132
4.9.4.3	Beneficio bruto anual	132
4.9.5	Costos operativos incrementales	132
4.9.6	Beneficio neto anual	132
4.9.7	Indicadores de rentabilidad	133
4.9.7.1	Retorno de la Inversión (ROI)	133
4.9.7.2	Periodo de Recuperación	133
4.9.8	Resumen de resultados	133
CONCLUSIONES		134
RECOMENDACIONES		136
BIBLIOGRAFÍA		137
ANEXOS		144

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1	Sistema de riego por goteo	29
Figura 2	Sistema de riego por gravedad	29
Figura 3	Sistema de riego por aspersión	30
Figura 4	Componentes de un sistema de riego localizado	33
Figura 5	Sistema de bombeo en serie	41
Figura 6	Localización	47
Figura 7	Organigrama empresarial	49
Figura 8	Diagrama de recorrido	56
Figura 9	Diagrama de procesos actual	57
Figura 10	Porcentaje de uso	59
Figura 11	Distribución actual y número de válvulas	60
Figura 12	Datos de riego	60
Figura 13	Diagrama de funciones Nivel 0	69
Figura 14	Diagrama de funciones Nivel 1	70
Figura 15	Diagrama de funciones Nivel 2	71
Figura 16	Sensor de nivel tipo boya	72
Figura 17	Revisión visual	73
Figura 18	Rain Bird TM2	74
Figura 19	PLC	75
Figura 20	Bomba centrífuga	76
Figura 21	Bomba de embolo	76
Figura 22	Soluciones módulo 1	77
Figura 23	Tanque de mezcla automático	85
Figura 24	Mezcla manual	85
Figura 25	Fertikit	86
Figura 26	Sistema con bomba dosificadora	87
Figura 27	Alternativas de solución Módulo 2	88
Figura 28	Sistema de filtros de anillos automático	95
Figura 29	Filtros de arena	96
Figura 30	Filtros de malla	97
Figura 31	Válvula de retrolavado automático	97
Figura 32	Válvula de retrolavado manual	98
Figura 33	Alternativas de solución módulo 3	99
Figura 34	Electroválvula	106
Figura 35	Válvula maual	107
Figura 36	Sensores de humedad	107
Figura 37	Goteros drip tape	108
Figura 38	Goteros autocompensantes	109
Figura 39	Alternativas de solución módulo 4	110
Figura 40	Solución general por módulos	114
Figura 41	Diseño CAD de la propuesta de sistema de riego	115
Figura 42	Puntos críticos para análisis CFD	117
Figura 43	Distribución de velocidades del flujo en el punto 1 del sistema de riego.	118

Figura 44	Distribución de velocidades del flujo en el punto 2 del sistema de riego.	119
Figura 45	Distribución de velocidades del flujo en el punto 3 del sistema de riego.	120
Figura 46	Comparación de la velocidad final respecto al rango óptimo de operación	123
Figura 47	Comparación de la velocidad final respecto al rango óptimo de operación	125
Figura 48	Casa de la Calidad	148
Figura 49	Plano de conjunto	149
Figura 50	Plano eléctrico	153
Figura 51	Simulación HMI: TIA portal	154
Figura 52	Diagrama de actividades para la validación del modelo de simulación . .	156

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1	Condiciones generales del cultivo de rosas bajo invernadero	27
Tabla 2	Coeficientes de rugosidad Hazen–Williams según el material	38
Tabla 3	Coeficientes de pérdida (K) para accesorios hidráulicos	39
Tabla 4	Velocidades recomendadas para fluidos en tuberías	43
Tabla 5	Datos generales de la empresa Falcon Farms – Flor de Azama	47
Tabla 6	Simbología del diagrama de recorrido	55
Tabla 7	Cursograma analítico	58
Tabla 8	Resumen y análisis de la información	59
Tabla 9	Caudales de operación considerados para el análisis hidráulico	61
Tabla 10	Parámetros geométricos	61
Tabla 11	Pérdidas por fricción en los ramales principales	62
Tabla 12	Detalle de pérdidas menores por accesorios del sistema	63
Tabla 13	Resumen de la Altura Dinámica Total requerida	64
Tabla 14	Presiones medidas en operación del sistema	65
Tabla 15	Especificaciones técnicas del sistema de riego	68
Tabla 16	Ventajas y desventajas del sensor de nivel tipo boya	73
Tabla 17	Ventajas y desventajas de la inspección visual del nivel de agua	73
Tabla 18	Análisis Rain Bird TM2 para Fertirrigación	74
Tabla 19	Ventajas y desventajas del sistema PLC + HMI	75
Tabla 20	Ventajas y desventajas de la bomba centrífuga	76
Tabla 21	Ventajas y desventajas de la bomba de émbolo	77
Tabla 22	Evaluación de criterios módulo 1	79
Tabla 23	Evaluación del criterio “Costo”	80
Tabla 24	Evaluación del criterio “Presión”	80
Tabla 25	Evaluación del criterio “Tiempo de riego”	81
Tabla 26	Evaluación del criterio “Caudal”	81
Tabla 27	Evaluación del criterio “Nivel de automatización”	81
Tabla 28	Evaluación del criterio “Norma ISO”	82
Tabla 29	Evaluación del criterio “Control de agua por línea”	82
Tabla 30	Evaluación del criterio “Demanda”	82
Tabla 31	Evaluación del criterio “Número de acciones”	83
Tabla 32	Evaluación del criterio “Disolución”	83
Tabla 33	Evaluación del criterio “Área”	83
Tabla 34	Evaluación global y priorización de alternativas	84
Tabla 35	Ventajas y desventajas del tanque de mezcla automático	85
Tabla 36	Ventajas y desventajas de la mezcla manual	86
Tabla 37	Ventajas y desventajas del fertikit	87
Tabla 38	Ventajas y desventajas del sistema automático de dosificación	87
Tabla 39	Evaluación de criterios módulo 1	90
Tabla 40	Evaluación del criterio “Costo”	91
Tabla 41	Evaluación del criterio “Presión”	91
Tabla 42	Evaluación del criterio “Tiempo de riego”	91
Tabla 43	Evaluación del criterio “Caudal”	92

Tabla 44	Evaluación del criterio “Nivel de automatización”	92
Tabla 45	Evaluación del criterio “Norma ISO”	92
Tabla 46	Evaluación del criterio “Control del agua”	93
Tabla 47	Evaluación del criterio “Demanda”	93
Tabla 48	Evaluación del criterio “Número de acciones”	93
Tabla 49	Evaluación del criterio “Disolución”	93
Tabla 50	Evaluación del criterio “Área”	94
Tabla 51	Evaluación global y priorización de alternativas (Módulo 2)	94
Tabla 52	Ventajas y desventajas del sistema filtros de disco automático	96
Tabla 53	Ventajas y desventajas del filtro de arena (medio granular)	96
Tabla 54	Ventajas y desventajas del filtro de malla	97
Tabla 55	Ventajas y desventajas del sistema de retrolavado automático	98
Tabla 56	Ventajas y desventajas del sistema de retrolavado manual	98
Tabla 57	Matriz de comparación de criterios del módulo de distribución	101
Tabla 58	Evaluación del criterio “Costo”	102
Tabla 59	Evaluación del criterio “Presión”	102
Tabla 60	Evaluación del criterio “Tiempo de riego”	102
Tabla 61	Evaluación del criterio “Caudal”	103
Tabla 62	Evaluación del criterio “Nivel de automatización”	103
Tabla 63	Evaluación del criterio “Filtración”	103
Tabla 64	Evaluación del criterio “Norma ISO”	103
Tabla 65	Evaluación del criterio “Demanda”	104
Tabla 66	Evaluación del criterio “Número de acciones”	104
Tabla 67	Evaluación del criterio “Área”	104
Tabla 68	Evaluación global y priorización de alternativas (Módulo 2)	105
Tabla 69	Ventajas y desventajas de las electroválvulas	106
Tabla 70	Ventajas y desventajas de las válvulas manuales	107
Tabla 71	Ventajas y desventajas del uso de sensores en sistemas de riego	108
Tabla 72	Ventajas y desventajas del drip tape	108
Tabla 73	Ventajas y desventajas de los goteros autocompensantes	109
Tabla 74	Valoración de criterios módulo 4	111
Tabla 75	Evaluación del criterio “Costo”	111
Tabla 76	Evaluación del criterio “Tiempo de riego”	112
Tabla 77	Evaluación del criterio “Caudal”	112
Tabla 78	Evaluación del criterio “Nivel de automatización”	112
Tabla 79	Evaluación del criterio “Cumplimiento de la norma ISO 13849-1”	112
Tabla 80	Evaluación del criterio “Control del agua”	113
Tabla 81	Evaluación del criterio “Demanda”	113
Tabla 82	Evaluación del criterio “Número de operaciones”	113
Tabla 83	Evaluación del criterio “Disolución”	113
Tabla 84	Ponderación final y prioridad de las alternativas	114
Tabla 85	Resumen de los resultados CFD en los puntos analizados	121
Tabla 86	Rangos de aceptación para la validación de simulaciones	122
Tabla 87	Resultados de simulación del caudal y velocidad del sistema	125
Tabla 88	Parámetros de diseño para la selección de la bomba	127
Tabla 89	Comparación del comportamiento hidráulico en el punto crítico	128
Tabla 90	Selección de la bomba centrífuga propuesta	129
Tabla 91	Costos de equipos del sistema propuesto	130
Tabla 92	Indicadores de rentabilidad del proyecto	133
Tabla 93	Tabla de verdad del permiso del sistema	150
Tabla 94	Tabla de verdad del llenado del tanque	150
Tabla 95	Tabla de verdad del encendido de bombas	150

Tabla 96	Tabla de verdad del sistema de filtrado	151
Tabla 97	Tabla de verdad del sistema de retrolavado	151
Tabla 98	Tabla de verdad del sistema Fertikit	152
Tabla 99	Tabla de verdad del tanque de mezcla	152

RESUMEN

El presente trabajo desarrolla una propuesta de mejora para un sistema de riego mediante la incorporación de herramientas de análisis, diseño y simulación. Inicialmente, se realizó un diagnóstico del sistema existente mediante diagramas de recorrido, procesos y hombre-máquina, lo que permitió identificar ineficiencias en uno de los controladores principales y problemas en la distribución de la presión en los bloques más alejados.

Posteriormente, se efectuó el análisis hidráulico del sistema para determinar las condiciones reales de operación y verificar la existencia de un déficit de presión. Con base en estos resultados, se planteó una solución técnica fundamentada en la implementación de un sistema de rebombeo.

El proceso de diseño consideró la voz del cliente y la voz del ingeniero, aplicando la metodología QFD para priorizar los requerimientos. Se desarrollaron diagramas funcionales por niveles, definiendo los módulos del sistema y evaluando alternativas técnicas hasta seleccionar la opción más adecuada. Además, se elaboró el diseño mecánico en CAD y el diseño del sistema de control eléctrico, incluyendo tablas de verdad, simulación en software especializado y programación en lenguaje Ladder.

Finalmente, se determinó la ubicación óptima del sistema mediante análisis de simulación de flujo, se seleccionó el equipo de bombeo adecuado y se realizó la evaluación económica del proyecto, demostrando su viabilidad técnica y financiera.

Palabras clave: Automatización industrial, sistemas de riego, análisis hidráulico, simulación, viabilidad económica.

ABSTRACT

This research develops an improvement proposal for an irrigation system through the incorporation of analysis, design, and simulation tools. Initially, a diagnosis of the existing system was carried out using route diagrams, process diagrams, and man-machine analysis, which allowed the identification of inefficiencies in one of the main controllers and pressure distribution issues in the most distant blocks.

Subsequently, a hydraulic analysis was performed to determine the actual operating conditions and verify the presence of a pressure deficit. Based on these results, a technical solution was proposed through the implementation of a booster pumping system.

The design process considered both the voice of the customer and the voice of the engineer, applying the QFD methodology to prioritize requirements. Functional diagrams were developed at different levels to define system modules and evaluate technical alternatives until selecting the most suitable option. In addition, the mechanical design was developed in CAD, and the electrical control system was designed using truth tables, simulation software, and Ladder programming.

Finally, the optimal system location was determined through flow simulation analysis, the appropriate pumping equipment was selected, and an economic evaluation was conducted, demonstrating the technical and financial feasibility of the proposal.

Keywords: Industrial automation, irrigation systems, hydraulic analysis, simulation, economic evaluation.

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

1.1 Planteamiento del Problema

Según el Registro Estadístico de Empresas (REEM) 2022, existen aproximadamente 834 empresas dedicadas al cultivo de flores, generando alrededor de 53.941 empleos registrados [1], además la industria florícola de nuestro país es reconocida a nivel mundial por la calidad y diversidad de sus productos, siendo las rosas la principal variedad exportada, representando hasta el 83 % de la producción nacional [2]. Teniendo en cuenta esto, el cambio climático se ha convertido en un factor crítico que afecta de manera directa a la actividad agrícola, especialmente en regiones sensibles como la sierra ecuatoriana. Variaciones en la temperatura y la precipitación impactan negativamente a la producción de las flores, afectando la disponibilidad de recursos hídricos y, en consecuencia, la eficiencia de sistemas como el riego [3] .

La Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO) (2018), menciona que el escurrimiento agrícola producto de eventos climáticos intensos es una de las principales fuentes de contaminación hídrica, elevando los niveles de nitratos, fósforo y metales pesados en los cuerpos de agua superficiales [4]. Para lo cual, el agua utilizada en el riego debe pasar por un proceso de tratamiento previo, lo que limita la cantidad disponible de este recurso, ya que, si se utiliza agua con residuos puede afectar directamente las plantas y la calidad del cultivo. El año anterior el país entero atravesó por una falta de lluvias que duro meses, lo cual nos indica que esto muy probablemente podría volver a pasar y se necesitara usar solo las cantidades adecuadas de agua para así no llegar a pasar por problemas dentro del proceso de riego y no afectar a la producción.

Estudios demuestran que la agricultura es responsable del 70 % del uso global de agua dul-

ce, y una porción creciente de esta proviene de fuentes contaminadas que deben ser tratadas [4]. A pesar de esto modelos de sistemas de riego actualmente operan de forma automatizada en intervalos de tiempo preestablecidos o inclusive aún pueden operan de manera manual, estos sistemas no toman en cuenta el estado real de humedad del suelo. Esto puede llevar a un uso innecesario del agua.

La principal problemática que enfrenta la empresa es el constante desperdicio de agua en el proceso de riego. Este uso ineficiente del recurso hídrico no solo conlleva un impacto ambiental negativo, al contribuir al agotamiento de fuentes de agua y afectar el equilibrio ecológico, sino que también repercute directamente en el aumento de los costos operativos de la florícola. El riego manual o no automatizado suele generar excesos, tanto por la duración como por la frecuencia del riego, sin considerar las necesidades reales de las plantas ni las condiciones ambientales.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo General

Diseñar una propuesta de sistema de riego automatizado para una florícola en la ciudad de Otavalo para reducir el consumo de agua.

1.2.2 Objetivos Específicos

- Recopilar información técnica relacionada con sistemas de riego automatizados en el sector florícola como base para el desarrollo de la propuesta
- Identificar las condiciones actuales y variables de estudio del proceso de riego en la florícola considerando aspectos técnicos operativos y contextuales.

- Definir una propuesta de automatización para el sistema de riego mediante la incorporación de herramientas tecnológicas como softwares de simulación y control.

1.3 Alcance y delimitación

Esta investigación se enfocará en la elaboración de una propuesta de automatización del sistema de riego en una florícola que cultiva diversas variedades de flores y rosas. El estudio se centrará en el análisis del proceso actual de riego y en el diseño de una propuesta.

El trabajo no llevara a cabo la implementación práctica del sistema. Como parte del estudio, se incluirá un estimado de los costos involucrados en la automatización, así como una valoración de los posibles beneficios que esta podría generar, como el ahorro de agua, menor carga operativa y mejor control del proceso.

Además, se analizará la viabilidad técnica y económica de la propuesta, con el fin de determinar si representa una solución útil y aplicable en el contexto de la empresa. Se considerará el sistema de riego de forma general, sin enfocarse en cada tipo de flor por separado, pero tomando en cuenta su impacto conjunto en la producción.

1.4 Justificación

1. Justificación Los avances tecnológicos alcanzados por la humanidad han impulsado a las empresas a adaptar sus estándares con el fin de responder eficazmente a las crecientes demandas del mercado. En este contexto, la automatización de procesos industriales ha cobrado especial relevancia, ya que implica el uso de maquinaria y equipos especializados capaces de ejecutar, de forma autónoma, tareas relacionadas con la producción, selección y control, reduciendo al mínimo la intervención humana. Este enfoque busca, en esencia, alcanzar mayores niveles de eficiencia operativa [5]. Un uso adecuado también puede ayudar en a menor consumo de recursos lo que reduciría el impacto ambiental que provocan las empresas al medio

ambiente.

El artículo 173 del Código Orgánico del Ambiente (COA) del Ecuador obliga a los operadores de proyectos, obras o actividades, públicas o privadas, a prevenir, evitar, reducir y, cuando sea posible, eliminar los impactos y riesgos ambientales que puedan generar sus actividades[6]. Teniendo en cuenta lo anterior, la propuesta aportara una posible solución para reducir el uso de agua en los cultivos dentro de la florícola mediante el uso de tecnologías que permitan hacer frente al problema [7].

La modernización y optimización de sistemas es una tarea muy importante para poder tener un mejor desempeño. Esta tarea es aún más relevante cuando se han utilizado métodos y técnicas ancestrales en la operación de dicho sistema. El consumo del agua para el uso agrícola es muy elevado, según el Banco Mundial en promedio se destina el 70 % a nivel mundial por lo que se convierte en una prioridad de agenda internacional [8].

En el estudio realizado por Vázquez-Dávila y Bravo-Benavides (2023) evidenció que un aumento de 1 °C en la temperatura máxima puede reducir la producción agrícola en un 5,89 %, mientras que un incremento del 1 % en las precipitaciones podría aumentarla en un 2,3 % [3]. Estos resultados refuerzan la necesidad de implementar tecnologías que permitan a los cultivos adaptarse a condiciones climáticas variables. En este sentido, la propuesta de automatización se plantea no solo como una posible mejora operativa, sino como una estrategia de adaptación climática que asegura la continuidad y eficiencia del proceso productivo en una florícola.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1 Cultivo de rosas:

El cultivo de las rosas requiere condiciones específicas para optimizar el rendimiento y la calidad de la flor cortada. Respecto a la densidad de plantación, la tendencia en viveros especializados es utilizar dos o tres filas por ejemplo, con una separación de entre 20 y 30 cm por planta, con pasillos de al menos un metro, lo que resulta en una densidad de 6 a 8 plantas por metro cuadrado cubierto [9].

La rosa se desarrolla óptimamente con temperaturas diurnas de 17°C a 25°C y nocturnas con una mínima de 15°C, sin superar una máxima de 28°C durante el día⁶. Mantener una temperatura nocturna por debajo de 15°C puede retrasar el crecimiento y producir flores deformes o con un exceso de pétalos, mientras que temperaturas excesivamente elevadas dan como resultado flores más pequeñas, con menos pétalos y colores más cálidos.

Tabla 1.
Condiciones generales del cultivo de rosas bajo invernadero

Parámetro	Condición
Filas por cama	Dos a tres filas de rosas.
Separación entre plantas	Distancia de 20 a 30 cm entre plantas.
Separación entre pasillos	Ancho mínimo de 1 m para labores de manejo.
Densidad de plantación	Aproximadamente de 6 a 8 plantas por m ² .
Temperatura diurna	Entre 17 °C y 25 °C, con un máximo de 28 °C.
Temperatura nocturna	Temperatura mínima recomendada de 15 °C.
Consumo hídrico	Aproximadamente 0,8 litros de agua por planta al día.

Fuente:[9]].

2.2 Sistemas de Riego

Se define como “El suministro de agua a los terrenos agrícolas de manera natural o artificial para suplir las necesidades hídricas de los cultivos, especialmente en zonas donde las lluvias son insuficientes o irregulares” y tiene el objetivo de proporcionar la humedad necesaria para el crecimiento, desarrollo y germinación de las plantas y suministrar nutrientes disueltos en el agua [10].

2.2.1 Tipos de sistemas de riego

Riego por goteo Es el sistema más eficiente en el uso del agua, ya que la aplica directamente a la zona radicular de las plantas mediante emisores o goteros. El agua se suministra lentamente y de manera controlada, manteniendo un nivel óptimo de humedad en el suelo sin desperdiciarla [11].

Este sistema requiere una inversión inicial más alta debido a la necesidad de tuberías, filtros y goteros, pero a largo plazo ahorra agua y fertilizantes al aplicarlos directamente donde la planta los necesita. Además, reduce la proliferación de malezas al no mojar áreas sin cultivos. El principal inconveniente es que los goteros pueden obstruirse si el agua no está bien filtrada, requiriendo mantenimiento periódico. Es ideal para cultivos de alto valor como frutales, viñedos y hortalizas en invernadero, así como para zonas con escasez de agua donde la eficiencia es crítica [12].



Figura 1.

Sistema de riego por goteo

Riego por gravedad Es el método más antiguo y tradicional de riego, donde el agua fluye por acción de la gravedad a través de canales, surcos o melgas hasta llegar a las plantas. No requiere energía externa como bombas, solo una fuente de agua y un terreno con pendiente controlada [13].

Sin embargo, tiene una baja eficiencia hídrica, ya que gran parte del agua se pierde por evaporación, filtración profunda o escorrentía. Además, puede provocar encharcamientos en algunas zonas mientras otras quedan secas. Es ideal para cultivos extensivos como arroz, maíz o pastos, donde se dispone de grandes volúmenes de agua y terrenos con cierta pendiente natural [14].



Figura 2.

Sistema de riego por gravedad

Riego por aspersión El riego por aspersión simula la lluvia natural mediante aspersores que distribuyen el agua bajo presión. Este sistema requiere una bomba para impulsar el agua a través de tuberías hasta los aspersores, que rocían el agua sobre los cultivos. Existen diferentes tipos, desde sistemas móviles que se pueden desplazar manualmente hasta sistemas fijos o automatizados como los pivotes centrales.

La principal ventaja es que permite una distribución más uniforme del agua que el riego por gravedad, adaptándose mejor a terrenos irregulares [15]. Sin embargo, consume más energía debido al bombeo y puede haber pérdidas por evaporación, especialmente en días ventosos o cálidos. Es adecuado para cultivos como hortalizas, frutales y cereales, donde se busca un equilibrio entre eficiencia y costos [16].



Figura 3.
Sistema de riego por aspersión

2.3 Automatización Industrial

Según [17], “La automatización industrial es el uso de sistemas de control (como computadoras, PLCs o robótica) y tecnologías de la información para manejar diferentes procesos y maquinaria en la industria, reemplazando en parte o totalmente la intervención humana. Los objetivos clave incluyen aumentar la productividad, mejorar la calidad del producto, reducir costos de mano de obra y garantizar operaciones seguras”.

2.3.1 Automatización en el sector agrícola

La automatización industrial ha transformado numerosos sectores productivos, y en la agricultura ha abierto nuevas posibilidades en términos de eficiencia, sostenibilidad y productividad. Según [18], la agricultura representa cerca del 70 % del consumo mundial de agua dulce para irrigar apenas el 25 % de las tierras agrícolas. Esta situación exige un uso más eficiente del recurso, lo cual ha dado paso al desarrollo de tecnologías de riego inteligente y controladas automáticamente, como parte de la llamada agricultura de precisión.

2.4 Medición del trabajo

Es el conjunto de técnicas que permiten determinar el tiempo requerido para llevar a cabo una tarea por un trabajador calificado, bajo condiciones definidas y con un método previamente establecido. Su propósito es establecer estándares de tiempo para mejorar la eficiencia, planificar la producción y balancear cargas laborales, utilizando técnicas como el cronometraje, el muestreo del trabajo o sistemas digitalizados de observación [19].

Según [19], las tecnologías de observación y análisis del trabajo han incorporado herramientas digitales que permiten una evaluación más precisa y menos invasiva de las actividades laborales repetitivas, lo cual mejora la confiabilidad en la estimación de tiempos estándar. Estas herramientas resultan especialmente útiles en entornos donde las actividades manuales coexisten con procesos automatizados.

2.5 Ingeniería de métodos

Es una disciplina que se encarga del análisis y diseño de métodos de trabajo más eficientes, mediante la observación, descripción y mejora sistemática de procesos operativos. Esta se apoya en herramientas como los sistemas de tiempos predeterminados (MTM, MOST), que permiten calcular el tiempo estándar para cada movimiento [20].

En el trabajo [21] proponen un marco basado en la técnica MOST (Maynard Operation Sequence Technique), combinada con herramientas de modelado digital (Digital Human Modeling), que permite descomponer tareas en movimientos elementales y calcular sus tiempos estándar de forma precisa. Permitiendo simular previamente los métodos de trabajo, identificar ineficiencias y establecer mejoras antes de su implementación en campo.

2.6 Simulación de sistemas productivos

Fundamental en el diseño y análisis de sistemas de ingeniería, ya que permite evaluar si un diseño cumple con las especificaciones mediante experimentos virtuales en lugar de físicos. Esto reduce los costos y el tiempo de desarrollo, al mismo tiempo que proporciona retroalimentación inmediata sobre las decisiones tomadas. A través de modelos computacionales, la simulación facilita la exploración de múltiples alternativas de diseño y la optimización del rendimiento del sistema antes de construir prototipos reales

2.7 Diseño de sistemas de distribución de agua

La infraestructura que se encarga de trasladar la cantidad necesaria de agua desde una fuente, ya sea desde bombas, estanques elevados o reservorios hasta los lugares donde se necesita el agua. Su diseño tiene que asegurar que el fluido se suministre con la presión y el caudal necesarios para cumplir con las necesidades operativas del sistema, ya sea industrial, agrícola o doméstico. La conducta hidráulica de la red es crucial para garantizar la estabilidad operacional, la eficiencia energética y una aplicación uniforme [22].

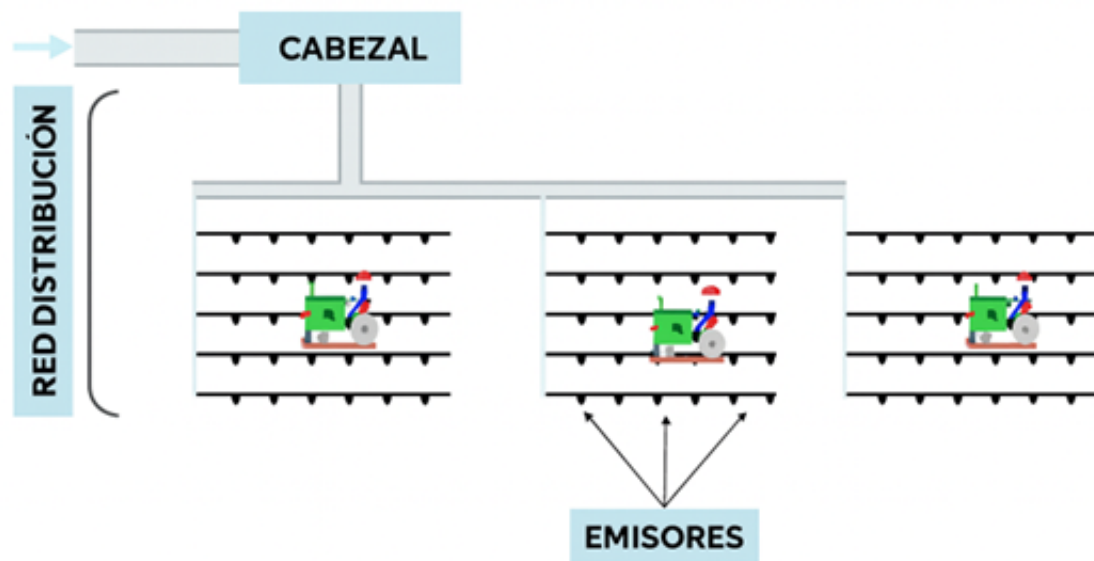


Figura 4.
Componentes de un sistema de riego localizado

2.7.1 Riego localizado

2.7.2 Fuente de abastecimiento

El agua puede obtenerse de diversas fuentes superficiales o subterráneas, dependiendo de la disponibilidad de la misma, es necesario construir un tanque de almacenamiento cuyos dimensionamientos dependerán de los requerimientos del cultivo y de las condiciones del agua propias del medio[23].

2.7.3 Cabezal del riego

Se llama cabezal de riego al conjunto de elementos destinados a filtrar, tratar, medir y suministrar agua a la red de distribución.

Se debe contar con un grupo de bombeo que ejerce la presión necesaria para alcanzar hasta el punto más alejado de la red, puede formar parte del cabezal o a su vez estar en un punto independiente[23].

El desempeño de un sistema de riego no depende únicamente del caudal o la presión, sino también de la uniformidad con la que el agua y los nutrientes son distribuidos en el área de cultivo. Una baja uniformidad de distribución puede provocar zonas con déficit hídrico y otras con sobreriego, incrementando la percolación profunda y la pérdida de fertilizantes, afectando tanto la eficiencia del riego como la sostenibilidad del sistema[24]

2.7.3.1 Sistemas de filtrado

Los sistemas de filtrado son de los componentes más importantes del cabezal, y se forman por varios tipos, que pretenden eliminar partículas y elementos que lleva el agua que pueden causar obstrucciones en cualquier parte de la red [25].

Tipos de filtros

Filtros de arena: Son depósitos llenos de arena o grava por la que circula el agua dejando las partículas, y cuentan con una gran capacidad de acumulación de residuos [23].

Filtros de malla: retienen sólidos en suspensión en la superficie de unas mallas dotadas de orificios de pequeño tamaño. fabricadas ya sea en acero o plástico.

Filtros de anillas: Es muy similar al filtro de mallas, pero aquí las impurezas quedan atrapadas entre anillas ranuradas que se encuentran agrupadas y ajustadas unas con otras.

Filtros autolimpiantes: En la actualidad hay filtros que incluyen mecanismos de inversión del flujo de agua y aprovechan la presión para expulsar la suciedad a un circuito de drenaje.

2.7.4 Equipos de fertirrigación

Los equipos que inyectan químicos en el agua se manejan mediante equipos de bombeo o mediante presión diferencial [23].

En el método de bombeo, se emplean bombas de desplazamiento positivo que inyectan los químicos directamente en la red de riego. Estas bombas pueden activarse mecánicamente desde la planta de bombeo o mediante la presión del agua de la propia línea de conducción. En este último caso, el agua impulsa un pistón que permite la inyección del fertilizante a una presión mayor que la del sistema principal.

Por otro lado, la inyección por presión diferencial se realiza mediante inyector tipo Venturi, los cuales funcionan a partir de la reducción del diámetro de la tubería. Esta reducción provoca un aumento de la velocidad del agua y una disminución de la presión, de acuerdo con el principio de Bernoulli. La caída de presión generada permite succionar la solución química desde un tanque externo e incorporarla al flujo principal del sistema de riego, inyectando el fertilizante en la garganta del Venturi.

Tanques: Presentan poca uniformidad de aplicación. Para el funcionamiento, se deriva una cierta cantidad de agua de la red principal; el agua se va mezclando con el fertilizante y , nuevamente, se incorpora a la red principal.

Inyectores tipo venturi: Dispositivos que no requieren de energía para el uso, además de que proporcionan el fertilizante de manera constante, sin embargo, presentan una gran pérdida de carga en las tuberías donde se instalan, lo que limita su uso si la red no tiene la suficiente presión.

Inyectores eléctricos o hidráulicos: inyectan mediante una bomba la solución contenida en un depósito que no está conectado a la red y por lo tanto mantienen una concentración constante de fertilizante, que puede ser seleccionada con un dosificador acoplado al inyector

2.7.5 Componentes

Tuberías: Son conductos cerrados, usualmente de sección circular, cuya función principal es transportar y conducir agua desde las fuentes de abastecimiento o puntos de tratamiento hasta los lugares de consumo, asegurando las condiciones de caudal y presión necesarias.

Forman la estructura principal de la red de distribución. Se diferencian por su material (PVC, polietileno, hierro dúctil, acero), su diámetro y su rol en la red [26].

Accesorios: Son elementos diseñados para ser acoplados a las tuberías con el fin de cambiar la dirección del flujo, modificar el diámetro de la conducción, bifurcar la red o permitir el ensamble y desmontaje de tramos. Algunos ejemplos son: codos, tes, reducciones, cruces y acoples. Su correcta selección es vital para minimizar las pérdidas de carga localizadas y asegurar la eficiencia del sistema [27].

Dispositivos de control: Son elementos hidráulicos y/o electromecánicos ubicados estratégicamente en la red para regular, medir y salvaguardar la presión, el caudal del agua y su calidad. Para que el sistema funcione de manera eficaz y segura, son fundamentales. Existen medidores de caudal, válvulas y dispositivos para monitorizar la calidad y la presión [28].

2.7.6 Eficiencia energética en sistemas de distribución de aguas

La eficiencia del sistema de bombeo está relacionada con una adecuada compatibilidad entre el sistema de distribución, la fuente de agua y la planta de bombeo. Además de eso, depende también de los componentes, como el motor, el eje de transmisión y la bomba en su conjunto. Un diseño adecuado y el mantenimiento del sistema de bombeo (como la reparación de fugas en el sistema de distribución o la bomba) pueden ser factores que aumenten considerablemente la eficiencia. Existen medidas más importantes de eficiencia vinculadas con el riego. Hay que tener en cuenta que el ahorro de agua implica un ahorro energético en términos de bombeo [29].

Usar la cantidad de agua requerida: Es importante usar solo la cantidad de agua necesaria para un cultivo, tipo de suelo y región en particular. El riego excesivo o no uniforme, en el que algunas áreas se riegan en exceso mientras que otras se riegan correctamente, resulta en un desperdicio de agua y de energía de bombeo [30].

2.7.7 Pérdidas de carga por fricción

Es la reducción de energía que sufre un fluido al fluir por una tubería, causada por la interacción viscosa entre las partículas del agua y las paredes internas del conducto [31].

La fricción depende de varios parámetros y la geometría del sistema como la longitud de la tubería (L), diámetro interno (D), caudal de flujo (Q), material y rugosidad, número de accesorios como codos, válvulas, uniones y reducciones que incrementan la pérdida total. Debido a estos parámetros, el diseño de una red de distribución se debe calcular cuidadosamente la selección del diámetro y la longitud para evitar presiones insuficientes en los puntos más lejanos [32].

Ecuación de Hazen–Williams

Para poder tener una estimación de la pérdida de energía por fricción en sistemas que transportan agua a presión, una de las ecuaciones más utilizadas es la ecuación empírica de Hazen–Williams, la American Water Works Association (AWWA) la recomienda debido a su precisión para tuberías de materiales plásticos y condiciones de flujo típicas tanto en sistemas agrícolas y urbanos, además cada material presenta un coeficiente de fricción como se puede observar en la tabla 1 [33] [32].

$$h_f = 10,67 \cdot \frac{L \cdot Q^{1,852}}{C^{1,852} \cdot D^{4,871}} \quad (2.1)$$

donde:

- h_f : pérdida de carga por fricción (mca),
- L : longitud de la tubería (m),
- Q : caudal de operación (m^3/s),
- C : coeficiente de rugosidad de Hazen–Williams,

- D : diámetro interno de la tubería (m).

Tabla 2.

Coefficientes de rugosidad Hazen–Williams según el material

<i>Material</i>	<i>e</i>
Plástico (PVC) nuevo	150
Plástico (PVC) antiguo	140
Fibrocemento	140
Hormigón	128
Acero nuevo	120
Acero usado	110
Fundición nueva	100
Fundición usada	85

Fuente: Adaptado de [33].

2.7.8 Pérdidas de cargas en accesorios

Las pérdidas de carga menores en sistemas hidráulicos corresponden a las pérdidas de energía ocasionadas por accesorios, cambios de dirección, válvulas y dispositivos instalados en la conducción, las cuales no dependen directamente de la longitud de la tubería, sino de la geometría y características de cada elemento [34].

Estas pérdidas se cuantifican mediante coeficientes adimensionales de pérdida K , que relacionan la pérdida de carga local con la energía cinética del flujo. La pérdida de carga asociada a un accesorio puede expresarse mediante la ecuación

La pérdida de carga menor asociada a accesorios hidráulicos se calcula mediante la siguiente expresión:

$$h_m = K \cdot \frac{v^2}{2g} \quad (2.2)$$

donde:

- h_m : pérdida de carga menor (m),
- K : coeficiente de pérdida propio del accesorio.
- v : velocidad media del flujo (m/s),
- g : aceleración de la gravedad (m/s²),
- $\frac{v^2}{2g}$: cabeza de velocidad (m).

Tabla 3.

Coeficientes de pérdida (K) para accesorios hidráulicos

Accesorio	K	Accesorio	K
Ampliación gradual (*)	0.30	Tee paso directo	0.60
Boquilla	2.60	Tee salida bilateral	1.80
Codo de 45°	0.40	Tee salida lateral	1.30
Codo de 90° estándar	0.90	Válvula de ángulo abierta	5.00
Codo de 90° radio largo	0.60	Válvula de bola abierta	0.20
Codo de 180°	2.20	Válvula de cheque de bisagra	2.50
Entrada de borda	1.00	Válvula de compuerta abierta	0.20
Entrada normal a tanque o tubo	0.50	Válvula de compuerta 50 % abierta	5.60
Filtro en Y	2.00	Válvula de globo abierta	10.00
Medidor de agua tipo disco	7.00	Válvula de pie	1.80
Medidor Venturi	2.50		
Reducción gradual (**)	0.20		

Fuente: [35].

2.7.9 Presión mínima requerida

Corresponde a la presión necesaria en el punto más desfavorable de la red para garantizar el funcionamiento adecuado de los emisores y la uniformidad en la aplicación del agua. En sistemas de riego por goteo, la presión de operación influye directamente en el caudal emitido por los goteros, por lo que valores inferiores a los recomendados por el fabricante pueden

provocar reducciones de caudal, baja uniformidad de riego y deficiencias en el suministro hídrico. Por esta razón, el diseño hidráulico debe asegurar que la presión mínima requerida esté disponible en el último emisor del sistema [36].

2.7.10 Altura geodésica

La altura geodésica corresponde a la diferencia de elevación entre el punto de succión y el punto de descarga del sistema hidráulico, y representa la energía potencial que el sistema de bombeo debe vencer para elevar el fluido. Este término depende exclusivamente de la topografía del terreno y de la ubicación relativa de los puntos extremos del sistema; es independiente del caudal de operación. Para el análisis la altura geodésica constituye uno de los componentes fundamentales de la altura dinámica total, ya que influye directamente en la presión requerida por la bomba para garantizar el suministro adecuado de agua en los puntos más alejados de la red [31][22].

2.7.11 Requerimiento de altura total

La altura total es crucial para la selección de bombas, el diseño del sistema y la eficiencia energética. Además de dimensionar tuberías y optimizar las operaciones [37].

Según [38], [39], los requerimientos de altura total de un sistema de riego están compuestos por la altura de succión, pérdidas de carga por fricción tanto en el sistema como en el cabezal, la presión de operación de los goteros y un 10 % adicional de pérdidas por los accesorios.

En sistemas de riego presurizado, la altura dinámica total requerida puede expresarse como:

$$H_T = H_g + h_f + h_m + H_{req} \quad (2.3)$$

donde,

H_g : altura geodésica

h_f : pérdidas por fricción

h_m : pérdidas menores por accesorios y equipos.

H_{req} : presión mínima requerida en el punto más desfavorable.

2.8 Sistemas de bombas en serie

”Se dice que un conjunto de n bombas está conectado en serie cuando la descarga de una bomba (i) termina en el tanque de succión de la siguiente bomba (i+1)”[40], tal como se muestra en la figura 4.

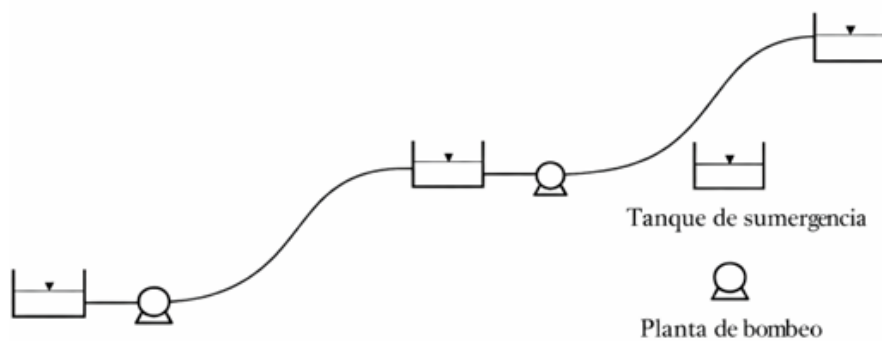


Figura 5.

Sistema de bombeo en serie

Fuente: [40].

Debido al principio de continuidad, si no existen estructuras de regulación entre las n bombas, todas ellas operan con el mismo gasto, mientras que la carga total que entregan será la suma de las cargas por bomba.

$$Q_1 = Q_2 = Q_3 = \dots = Q_n \quad (2.4)$$

$$H_{BT} = \sum_{i=1}^n H_{B_i} \quad (2.5)$$

En los sistemas de bombeo en serie, el uso de varias etapas de bombeo no genera variaciones significativas en la eficiencia total del sistema, ya que los cambios suelen ser mínimos. Estos arreglos se emplean cuando es necesario incrementar la carga disponible o evitar problemas de cavitación en la succión de la bomba principal, mediante la incorporación de bombas de apoyo.

En sistemas donde se deben vencer grandes cargas hidráulicas y las distancias de conducción son considerables, resulta técnicamente conveniente distribuir las plantas de bombeo a lo largo de la red, en lugar de utilizar una sola planta con bombas de múltiples etapas, debido a los mayores costos y resistencias asociadas. Asimismo, la instalación de tanques de sumergencia entre plantas de bombeo permite un funcionamiento hidráulico estable e independiente de cada etapa, facilitando el análisis, la operación y el mantenimiento del sistema [40].

2.9 Cavitación

La cavitación es un fenómeno hidráulico que ocurre cuando la presión local de un fluido desciende hasta valores cercanos a su presión de saturación, provocando la formación de burbujas de vapor. Estas burbujas se generan debido a reducciones de presión asociadas a cambios de velocidad, geometría de la tubería o condiciones de operación, y colapsan al desplazarse hacia zonas de mayor presión [41].

El colapso de las burbujas produce fuerzas de impacto elevadas que generan ruido, vibraciones, pérdida de eficiencia y erosión de componentes, especialmente en bombas hidráulicas, donde suele manifestarse en la zona de succión y en el impulsor. Este fenómeno está estrechamente relacionado con variables como la temperatura del fluido, la presión de operación, el caudal y la velocidad del flujo.

2.10 Velocidad de flujo para sistemas hidráulicos

La velocidad de flujo es una variable esencial en el diseño y operación de sistemas de transporte de fluidos. Para lograr un rendimiento óptimo, se debe considerar el tipo de fluido, el diámetro de la tubería, las propiedades del material y las condiciones operativas. La velocidad de flujo recomendada varía según la aplicación, pero siempre debe equilibrar la eficiencia energética, la durabilidad de las tuberías y los equipos, y los costos operativos. Mantener una velocidad adecuada contribuye a evitar problemas como la cavitación, la sedimentación y el desgaste excesivo de las instalaciones [42].

Tabla 4.

Velocidades recomendadas para fluidos en tuberías

Fluido	Tipo de flujo	Velocidad (m/s)
Líquidos poco viscosos	Flujo por gravedad	0.15 – 0.30
	Entrada de bomba	0.3 – 0.9
	Salida de bomba	1.2 – 3
	Línea de conducción	1.2 – 2.4
Líquidos viscosos	Entrada de bomba	0.06 – 0.15
	Salida de bomba	0.15 – 0.6
Vapor de agua	–	9 – 15
Aire o gas	–	9 – 30

Fuente: [43]

2.11 Ecuaciones utilizadas por SolidWorks Flow Simulation

SolidWorks resuelve sus análisis mediante las ecuaciones de Navier-Stokes para flujo laminar, las cuales se fundamentan en los principios de conservación de la masa, cantidad de movimiento y energía. Estas ecuaciones permiten describir el movimiento del fluido considerando efectos de presión, viscosidad y fuerzas externas [44].

2.11.0.1 Ecuación de conservación de la masa

La conservación de la masa, también conocida como ecuación de continuidad, se expresa como:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{u}) = 0 \quad (2.6)$$

donde ρ representa la densidad del fluido y $\vec{u}$ es el vector velocidad.

Para fluidos incompresibles, como el agua considerada en este estudio, la densidad permanece constante, por lo que la ecuación se simplifica a:

$$\nabla \cdot \vec{u} = 0 \quad (2.7)$$

2.11.0.2 Ecuación de conservación de la cantidad de movimiento

La ecuación de conservación del momento para un fluido newtoniano en régimen laminar se describe mediante la ecuación de Navier–Stokes:

$$\frac{\partial(\rho \vec{u})}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{u} \otimes \vec{u}) = -\nabla p + \nabla \cdot \boldsymbol{\tau} + \rho \vec{g} \quad (2.8)$$

donde p es la presión estática, $\vec{g}$ es la aceleración gravitacional y $\boldsymbol{\tau}$ es el tensor de esfuerzos viscosos.

Para fluidos newtonianos, el tensor de esfuerzos viscosos se define como:

$$\tau_{ij} = \mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \delta_{ij} \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \right) \quad (2.9)$$

siendo μ la viscosidad dinámica del fluido y δ_{ij} el delta de Kronecker.

2.11.0.3 Ecuación de conservación de la energía

La ecuación de conservación de la energía permite describir la variación de la energía total del fluido y se expresa como:

$$\frac{\partial(\rho E)}{\partial t} + \nabla \cdot [\vec{u}(\rho E + p)] = \nabla \cdot (k \nabla T) + Q \quad (2.10)$$

donde E es la energía total por unidad de masa, k es la conductividad térmica del fluido, T es la temperatura y Q representa los términos fuente de energía.

CAPÍTULO III

MATERIALES Y MÉTODOS

3.1 Contexto de la empresa

3.1.1 Historia

Falcon Farms se fundó en 1987 como un distribuidor para floristas de Colombia y Ecuador. Con una visión de negocio basada en la innovación y la integración vertical, la compañía pronto dio un paso crucial en 1989 al establecer su primera finca propia en Colombia.

Durante la década de 1990, expandió su producción a Ecuador y consolidó su modelo de negocio, llegando a poseer un total de 12 plantaciones en Sudamérica.

En los años 2000, la empresa extendió su presencia a Estados Unidos, inaugurando seis centros logísticos estratégicos para optimizar la distribución a los mercados minoristas.

En la siguiente década, se enfocó en la estandarización y productividad, obteniendo certificaciones internacionales que avalan su compromiso con la sostenibilidad y la seguridad. Recientemente, se ha posicionado como un proveedor integral de soluciones florales, gestionando todos los aspectos de la cadena de suministro para ofrecer flores de alta calidad, uniformes y sostenibles a sus clientes globales[45].

3.1.2 Datos generales:

Tabla 5.

Datos generales de la empresa Falcon Farms – Flor de Azama

Razón social	Falcon Farms Ecuador S.A. – Flor de Azama
Gerente de Finca	Ing. Andrés Corredor.
Dirección	Vía Quiroga KM 5, Otavalo - Ecuador.
Teléfono	+593 (6) 240-1080
Correo electrónico	info@falconfarmsonline.com
Sitio web	https://falconfarmsonline.com/
Ciudad	Otavalo – Imbabura
Actividad económica	Producción, comercialización y exportación de flores de corte (Gypsophila, rosas, entre otras especies), con enfoque en sostenibilidad ambiental y responsabilidad social.
Clima	Clima de Otavalo (68°F) y altitud (8,307 pies). Según el censo de 2010, la ciudad tiene 39,354 habitantes.

Fuente: Elaboración propia

3.1.3 Localización:



Figura 6.
Localización

3.2 Direccionamiento estratégico

3.2.1 Misión:

Producir y comercializar flores de corte de exportación para satisfacer los requerimientos de nuestros clientes, garantizando la consistencia en la calidad de nuestros productos y servicio superior; asegurando costos de operación competitivos, bienestar y desarrollo integral de nuestra gente, responsabilidad social y ambiental; para garantizar la rentabilidad sostenible del grupo.

3.2.1.1 Visión

Falcon Farms es reconocida por:

- Sus altos niveles de productividad rentable logrados.
- Ser el mejor aliado de clientes y proveedores.
- Ser una buena opción laboral en el sector.
- Su responsabilidad social y ambiental.

3.2.1.2 Organigrama

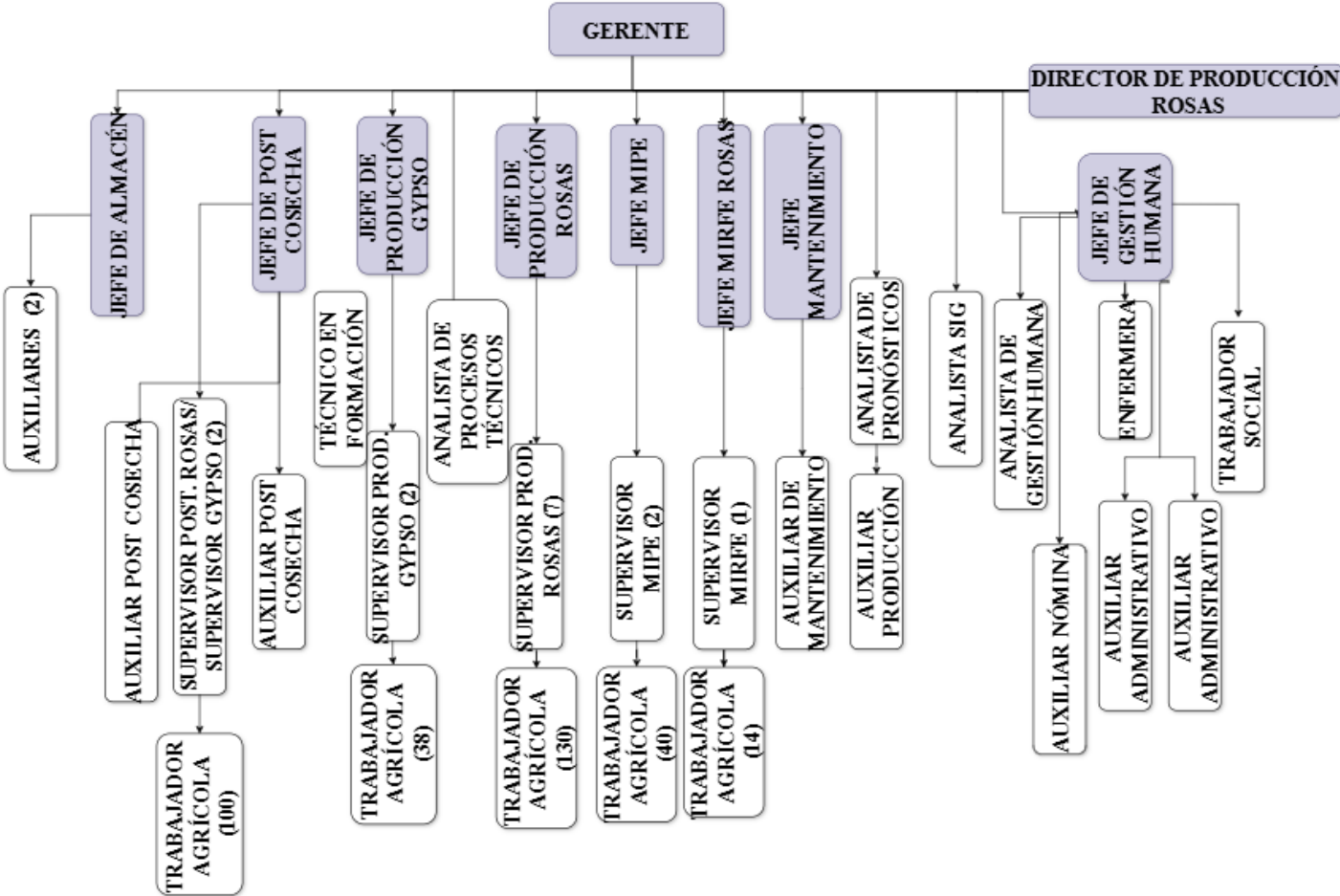


Figura 7.
Organigrama empresarial

3.3 Tipo de investigación

3.3.1 Investigación documental:

Es el proceso documental, sistemático y estratégico que, mediante la consulta y observación de fuentes bibliográficas, busca encontrar bases para el desarrollo de la investigación. Es el momento de la investigación que conformará el marco teórico, así como la bibliografía que sustentará la investigación [46].

Se definió cuál es la pregunta de investigación y se buscaron fuentes de información confiables como E-libro, Scielo, Web of Science, entre otras, y se establecieron criterios de elegibilidad para decidir qué estudios se incluirán o excluirán.

Cada artículo y documento se revisaron sus resúmenes y con esto se pudo filtrar artículos duplicados, o que no aporten a la investigación, de los que quedaron, se consiguieron los artículos completos y se leyeron detalladamente, aplicando nuestros estándares de inclusión.

De los que quedaron se obtuvo la información más importante como los resultados que tuvieron y los métodos que siguieron.

3.3.2 Investigación de campo:

Es aquella que se realiza en el lugar de los hechos que implica tomar la información directa de la fuente, sin manipular ni controlar variables, los datos provienen directamente del grupo de estudio y nos permite observar un fenómeno en sus condiciones reales [46].

Con el objetivo de diagnosticar la situación actual de la compañía, se realizaron inspecciones técnicas para evaluar en detalle los procesos, equipos, materiales, entorno y estaciones de trabajo. Para complementar, se hicieron entrevistas con el personal directivo y operativo, a fin de obtener una perspectiva integral de las condiciones reales de la empresa.

3.3.2.1 Técnicas de investigación:

Observación directa:

Depende del grado en el que el científico se involucre con lo observado, existen varios tipos de observación simple: no regulada, participante y no participante, además es una técnica subjetiva, el rigor científico lo tienen que dar las herramientas e instrumentos que permitan registrar de manera sistemática [47].

■ Herramientas

Excel Usado para la elaboración de un checklist con puntos a tenerse en cuenta en la investigación y organización de la información obtenida en campo.

■ Instrumentos:

Checklist

Son herramientas metódicas diseñadas para uniformar y garantizar la calidad en el proceso de observación, facilitando el registro sistemático y verificable de información. Según [48], estos instrumentos aseguran que se cumplan los criterios básicos de calidad, incluso si el evaluador no tiene experiencia en la metodología.

En checklist usado se construyó a partir de ítems que deben tenerse en cuenta en un sistema de riego que se presentan en [34], además se tuvo en cuenta la norma ISO 19011 que presenta directrices para poder hacer una buena auditoría, y se presentan parámetros a cumplirse, como la categorización, criterios y evidencias[49].

Entrevistas:

El investigador se reúne con el informante, el cual debe contar con información y experiencia sobre el tema de estudio, de acuerdo al tipo de pregunta se clasifican en estructurada,

semiestructurada o no estructurada [46].

”Las entrevistas abiertas se fundamentan en una guía general de contenido y el entrevistador posee toda la flexibilidad para manejarla”[50].

Se realizó una entrevista no estructurada con el jefe de área con el fin de obtener la percepción de la dirección respecto a la implementación de sistemas automatizados en los procesos del área MIRFE. Asimismo, se entrevistó al personal operativo y de mantenimiento para conocer a detalle las actividades que realizan actualmente, identificar limitaciones del proceso y determinar las posibles mejoras que podrían implementarse.

■ Instrumentos:

Cuaderno del investigador

El cuaderno del investigador se empleó como instrumento de registro para documentar observaciones, incidencias, datos preliminares, croquis y comentarios relevantes obtenidos durante las visitas a campo. Este instrumento, ampliamente utilizado en investigación aplicada [51], permite recoger información cualitativa contextual que no se obtiene mediante formatos estructurados. Su uso facilitó la comprensión del funcionamiento real del sistema de riego, complementando los datos del checklist y las mediciones directas, y aportando validez al proceso investigativo.

3.4 DISEÑO DE INGENIERÍA

3.5 Análisis QFD

Se obtuvieron los requerimientos de diseño mediante documentación técnica y encuestas abiertas a los involucrados del proyecto de investigación; mediante el análisis QFD se interpretaron los requisitos de la empresa (o voz del cliente) en requerimientos técnicos del produc-

to (o voz del ingeniero)[52], Es así como se obtienen las especificaciones técnicas del proyecto.

3.6 Selección de alternativas

Se realizó un análisis funcional del sistema de riego, identificándose los siguientes módulos principales: 1) Programación, 2) Fertilización, 3) Filtración y 4) Distribución. Cada módulo cumple funciones específicas dentro del sistema y, para cada una de ellas, se plantearon distintas alternativas de solución.

Las alternativas propuestas fueron evaluadas mediante un análisis de criterios ponderados. En función del orden de importancia de las especificaciones técnicas definidas, se seleccionó la alternativa que presenta el mejor desempeño global, constituyendo la base de la solución propuesta desarrollada.

3.7 Análisis CFD

Con el objetivo de evaluar el comportamiento del flujo dentro del sistema de riego y analizar el efecto de las modificaciones propuestas, se realizó un análisis de dinámica de fluidos computacional (CFD). Este análisis permitió simular el régimen de flujo en el sistema bajo diferentes configuraciones, considerando las condiciones de operación establecidas en el diseño.

El análisis CFD se empleó como una herramienta de apoyo para la evaluación del desempeño hidráulico del sistema, permitiendo identificar zonas críticas y validar la efectividad de la configuración propuesta.

3.8 Diseño de la propuesta

El desarrollo de la propuesta se inició con el análisis del sistema de riego existente, identificándose deficiencias en el suministro hidráulico en los bloques más alejados, asociadas a bajas velocidades de flujo y pérdidas acumuladas de presión. A partir de este diagnóstico, se realizó un análisis CFD que permitió evaluar el comportamiento del flujo en distintos escenarios de operación, determinándose el punto crítico del sistema y estableciendo los parámetros hidráulicos necesarios para la mejora propuesta.

Considerando los resultados obtenidos, se definió una nueva configuración hidráulica que incorpora una ramificación adicional y una segunda entrada de caudal, permitiendo alcanzar velocidades de flujo cercanas al rango óptimo recomendado para sistemas de riego presurizado. Con base en estos parámetros, se procedió a la selección de los componentes del sistema, en particular las bombas centrífugas y los elementos auxiliares, aplicando criterios de operación segura, eficiencia energética y prevención de cavitación.

La selección de los equipos fue validada mediante cálculos hidráulicos tradicionales y contrastada con los resultados de las simulaciones CFD, garantizando que los componentes seleccionados soportan las condiciones reales de operación del sistema. Adicionalmente, se incorporó un tanque de succión previo al sistema de bombeo con el objetivo de asegurar una columna de agua constante y reducir el riesgo de cavitación.

CAPÍTULO IV

RESULTADOS Y ANÁLISIS

4.1 Ingeniería de métodos y medición del trabajo

4.1.1 Diagrama de recorrido actual

Es necesario visualizar el recorrido actual del proceso de riego, para poder modificar el espacio de trabajo una vez propuesto el sistema, en la tabla 6 se muestra la simbología utilizada:

Tabla 6.

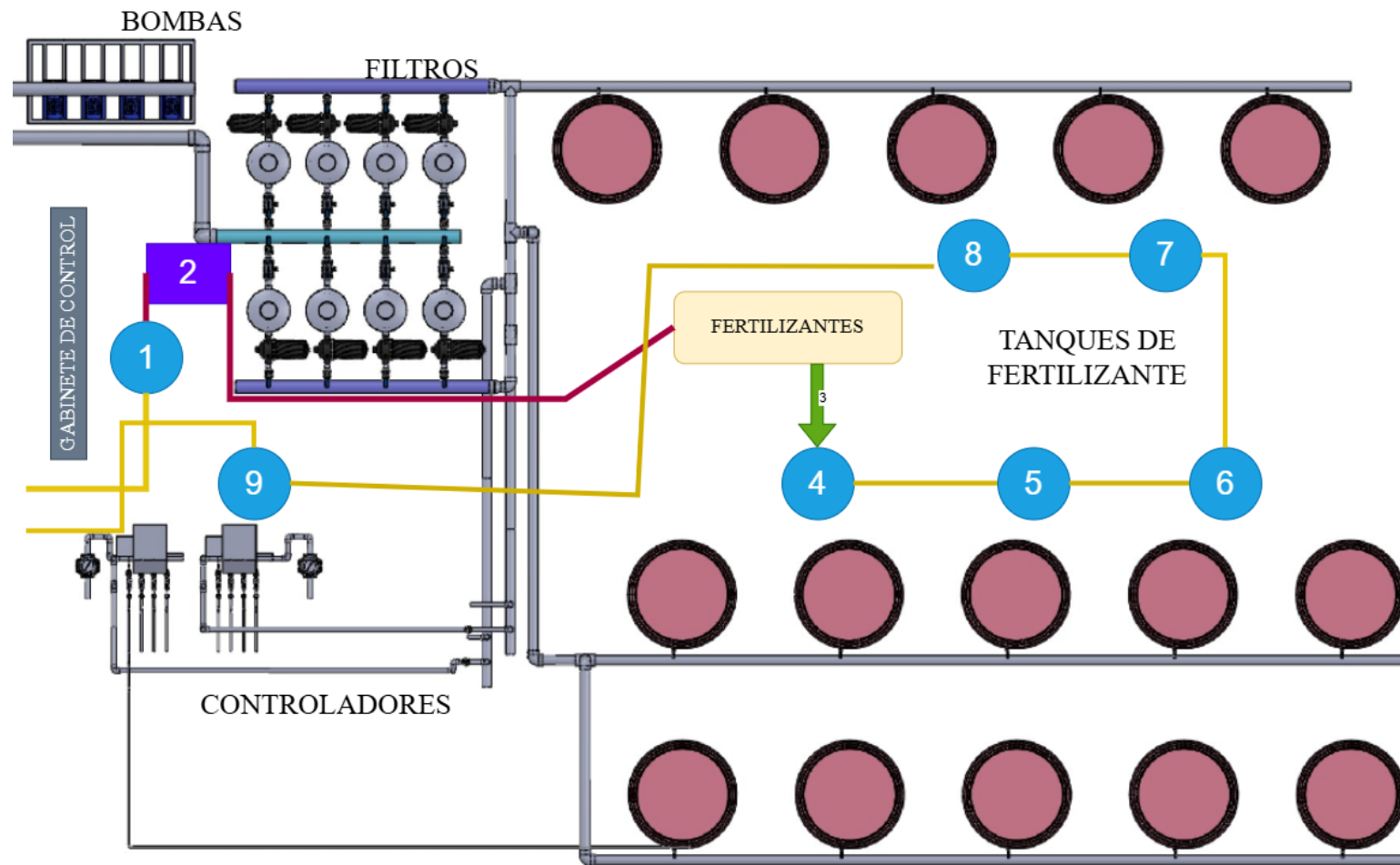
Simbología del diagrama de recorrido

Símbolo	Significado	Línea	Significado
	Operación		Recorrido de operador de corte
	Transporte		Recorrido del gerente propietario
	Inspección		Recorrido de maquila
	Demora		Recorrido de operador de estampado
	Almacenamiento		Recorrido de operador de embalaje

En la figura 8 se puede observar el diagrama de recorrido actual desde que se prenden los equipos hasta la programación del riego, en donde nos permitirá hacer una comparación y una mejor distribución una vez hecha la propuesta de mejora.

Figura 8.

Diagrama de recorrido



4.1.2 Diagrama de procesos

En la figura 9 se aprecia el recorrido de los procesos que se llevan a cabo en la jornada laboral tanto del personal operativo como de gestión.

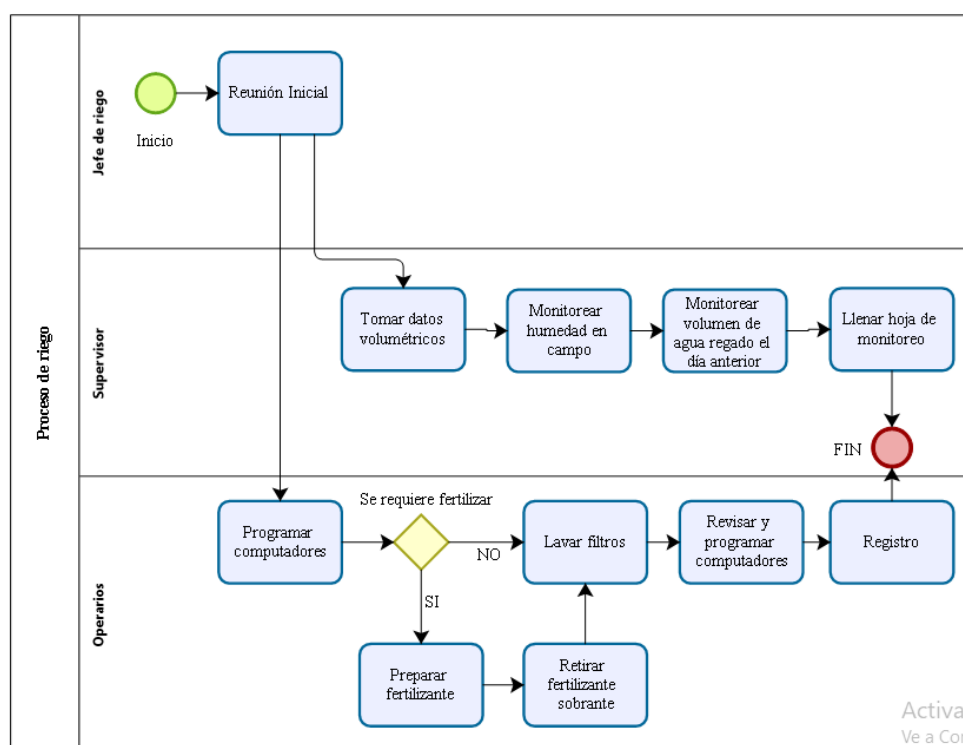


Figura 9.
Diagrama de procesos actual

4.1.3 Cursograma analítico actual

Para el análisis del proceso también es necesario elaborar el cursograma analítico, ya que permite desglosar cada actividad en sus elementos fundamentales y clasificarla según su tipo: operación, transporte, inspección, demora o almacenamiento. En la tabla 7 se presenta el cursograma analítico actual, donde se detalla la secuencia real del flujo de trabajo, los tiempos asociados y los puntos críticos del proceso. Esta herramienta facilita identificar inefficiencias, actividades innecesarias y oportunidades de mejora dentro del sistema operativo.

Tabla 7.
Cursograma analítico

Diagrama N°:	1				
Objeto:					
Actividad:	Sistema de riego	Lugar:			
Operario(s): 12	Ficha N°: 1				
Elaborado por: Javier Goveo	Fecha: 19/11/2025				
Resumen de actividades					
Actividad	Actual	Propuesta / Economía			
Operación	8				
Transporte	0				
Espera	1				
Inspección	2				
Almacenamiento	0				
Distancia (m)	41 m				
Tiempo (min)	510				
Total:					
Detalle del proceso					
Descripción	Cantidad	Tiempo	Distancia	Símbolo	Observaciones
Reunión con el equipo	0	15 min	0 m		
Tomar datos volumétricos	0	10 min	6 m		
Programar los computadores	0	10 min	10 m		
Lavar los filtros	0	40 min	2 m		
Preparar el fertilizante	0	60 min	10 m		
Retirar fertilizante	0	10 min	10 m		
Revisar y programar los computadores	0	10 min	3 m		
Monitorizar humedad de suelo en campo	0	120 min	0 m		
Monitorizar el volumen de agua regada el día anterior	0	185 min	0 m		
Llenar hoja de monitoreo que está en cada cama	0	20 min	0 m		
Registro	0	30 min	0 m		

4.1.4 Diagrama Hombre-Máquina actual

Para la aplicación del diagrama hombre-máquina es indispensable conocer la distribución de actividades y los tiempos asociados a cada operación, lo cual permite visualizar de forma clara la relación entre el operador y los computadores, evidenciando los periodos de trabajo activo, inactividad y espera. Esta herramienta resulta fundamental para identificar qué computador concentra la mayor carga de trabajo y detectar posibles desbalances en el proceso.

Además nos permitió observar que el equipo con mayor carga de trabajo es el computador 4, también se ha observado que es el sector que mayor área abarca.

Tabla 8.

Resumen y análisis de la información

Resumen y Análisis de la información					
Tipo	Tiempo del Ciclo min.	Tiempo de Acción min.	Tiempo de Inactividad min.	% Utilización	% Utilización Óptima
Operario	510,00	510,00	0,00	100,0 %	80,0 %
Computador 1	510,00	390,00	120,00	76,5 %	80,0 %
Computador 2	510,00	390,00	120,00	76,5 %	80,0 %
Computador 3	510,00	390,00	120,00	76,5 %	80,0 %
Computador 4	510,00	340,00	170,00	66,7 %	80,0 %

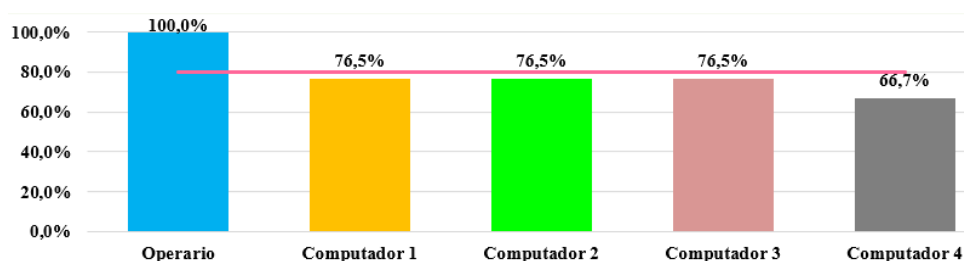


Figura 10.

Porcentaje de uso

4.2 Distribución Actual

En la figura 11 se observa la distribución de la empresa y el número de válvulas que controla cada computador desde su respectivo cuarto de control. Se observa que el computador encargado de los sectores 3 y 4 gestiona un mayor número de válvulas y abarca una extensión de terreno más amplia en comparación con los otros equipos.

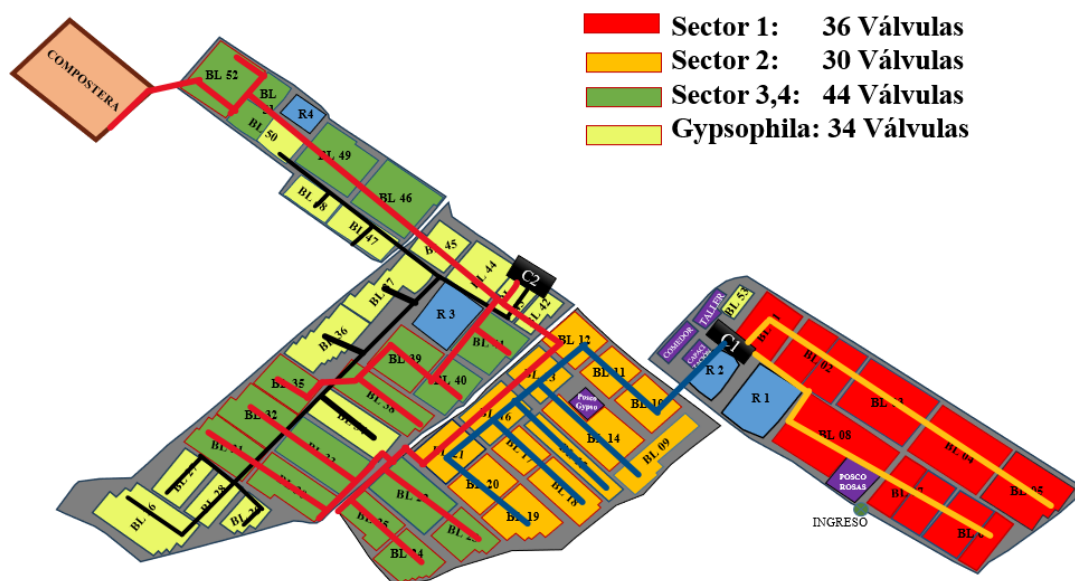


Figura 11.
Distribución actual y número de válvulas

Después de registrar los tiempos, se calcula un promedio general de cuánto tarda cada computador por pulso. Así, se evidencia que los sectores 3 y 4 tienen tiempos considerablemente más altos que los demás sectores con una diferencia de alrededor de una hora y media, como se observa en la figura 12.

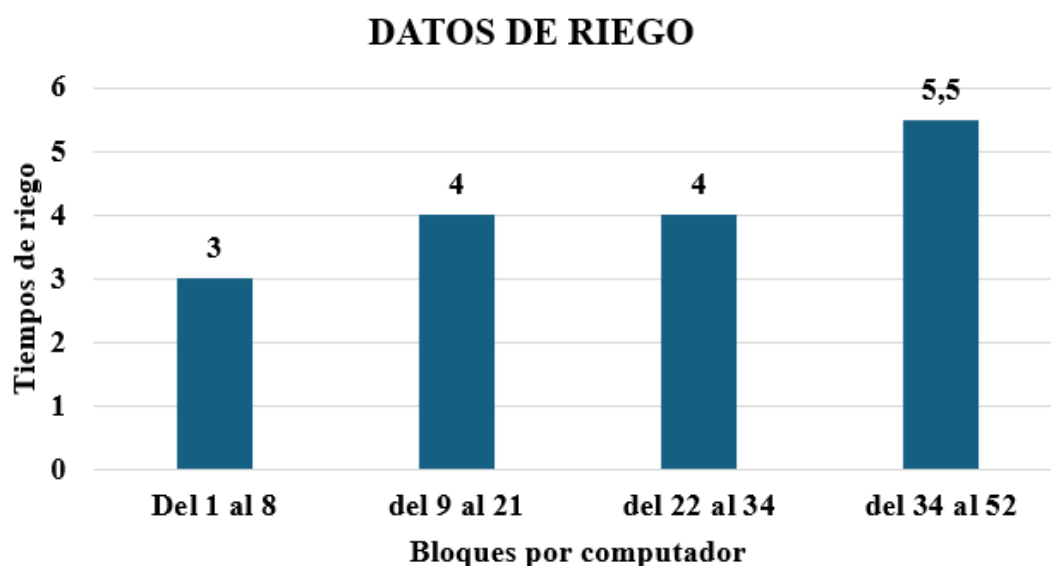


Figura 12.
Datos de riego

4.3 Diagnóstico del sistema

4.3.1 Condiciones de operación

El sistema actualmente trabaja con 2 bloques en simultáneo, para lo cual el diagnóstico se realizará tomando la sumatoria de las necesidades hídricas mínimas de los bloques más alejados del cuarto de control, que se detallan en la tabla 9.

Tabla 9.

Caudales de operación considerados para el análisis hidráulico

Descripción	Caudal (m ³ /h)
Bloque más lejano	14,45
Segundo bloque simultáneo	13,65
Caudal total simultáneo	28,10

Fuente: Elaboración propia

4.3.2 Geometría de la red analizada

La red principal que alimenta a los bloques más alejados presenta las siguientes características. Debido a que el sistema presenta derivaciones, el análisis se consideró que el caudal circula por el ramal principal más largo durante el escenario crítico, la tabla 10 muestra el resumen de los parámetros del sistema.

Tabla 10.

Parámetros geométricos

Parámetro	Valor
Diámetro hidráulico (D)	0.09 m
Longitud del ramal más largo	700 m
Longitud del ramal alterno	521 m
Material	PVC
Coefficiente Hazen–Williams (C)	140

Fuente: Elaboración propia.

4.3.3 Pérdidas de carga por fricción

Las pérdidas por fricción se calcularon mediante la ecuación de Hazen–Williams adecuándola al sistema internacional.

$$h_f = 10,67 \cdot \frac{L \cdot Q^{1,852}}{C^{1,852} \cdot D^{4,871}} \quad (4.1)$$

donde:

- h_f : pérdida de carga por fricción (mca),
- L : longitud de la tubería (m),
- Q : caudal de operación (m³/s),
- C : coeficiente de rugosidad de Hazen–Williams,
- D : diámetro interno de la tubería (m).

Para el cálculo se realizó previamente la conversión del caudal desde metros cúbicos por hora a metros cúbicos por segundo:

$$Q = \frac{28,1}{3600} = 0,00781 \text{ m}^3/\text{s} \quad (4.2)$$

Tabla 11.

Pérdidas por fricción en los ramales principales

Ramal	Longitud (m)	Caudal (m ³ /h)	Pérdida por fricción h_f (mca)
Ramal principal	700	28.1	12.3
Ramal alternativo	521	28.1	8.04

Fuente: Elaboración propia

Para el análisis del sistema se adoptó el peor caso hidráulico, correspondiente al ramal principal, por lo que la pérdida de carga por fricción considerada es:

$$h_f = 12,3 \text{ mca} \approx 1,21 \text{ bar} \quad (4.3)$$

4.3.4 Pérdidas menores

Las pérdidas menores son las pérdidas ocasionadas por accesorios y equipos instalados en el cabezal de riego y/o en la red de distribución, para esto se tuvo en cuenta fichas técnicas y tablas hidráulicas que para obtener los coeficientes y aplicar la fórmula de pérdidas menores .

Teniendo en cuenta una velocidad de 1,41 m/s, la gravedad y los coeficientes, se obtuvo una pérdida total de 0,77 mca o 0,075 bar

Tabla 12.

Detalle de pérdidas menores por accesorios del sistema

Elemento / Accesorio	Ubicación (tramo)	Cantidad	Pérdida unitaria (mca)	Pérdida total (mca)
Filtro de arena	Cabezal principal	1	0.51	0.052
Filtro de anillas	Cabezal principal	1	0.20	0.020
Codo 90°	Línea principal	5	0.90	0,460
TEE (paso directo)	Línea principal	4	0.60	0,243
TOTAL				0,7719

Fuente: Elaboración propia.

4.3.5 Presión mínima y altura geodésica

El sistema de riego utiliza goteros ARIES de 1 L/h. De acuerdo con la ficha técnica del fabricante, la presión mínima recomendada de operación es de 10 psi, la cual es equivalente a una altura de presión de.

$$H_{req} = 7,038 \text{ mca} \approx 0,69 \text{ bar} \quad (4.4)$$

Para el cálculo de la altura geodésica se tomó la altura a la que está el cabezal de riego y se hizo la diferencia con la altura a la que se encuentra el punto más desfavorable del sistema.

$$H_g = 12,1 \text{ mca} \approx 1,19 \text{ bar} \quad (4.5)$$

4.3.6 Altura dinámica total

La altura dinámica total requerida del sistema se determinó mediante la sumatoria de todas las pérdidas que tiene el sistema, de acuerdo con la siguiente expresión y como se puede ver en la tabla 13, dándonos un resultado de 32,2 mca o 3,16 bar:

$$H_T = H_g + h_f + h_m + H_{req} \quad (4.6)$$

Tabla 13.

Resumen de la Altura Dinámica Total requerida

Componente	Símbolo	Valor (mca)
Altura geodésica	H_g	12.10
Pérdidas por fricción	h_f	12.3
Pérdidas menores	h_m	0,77
Presión mínima requerida	H_{req}	7.04
Altura Dinámica Total	H_T	32.2

Fuente: Elaboración propia.

4.3.7 Mediciones en campo

Se tomo mediciones en durante la operación del sistema en dos puntos, la salida del cuarto de control y la llegada a los puntos mas alejados, se obtuvo los datos mostrados en la tabla 14.

Tabla 14.

Presiones medidas en operación del sistema

Punto de medición	Presión (bar)	Presión equivalente (mca)
Salida de la bomba	2.50	25.5
Entrada del bloque lejano	0.65	6.6

Fuente: Elaboración propia

A partir de las mediciones realizadas, la caída real de presión en el sistema se determina como:

$$\Delta H_{real} = 2,5 - 0,65 = 1,85bar \quad (4.7)$$

4.3.8 Diagnóstico

El análisis del sistema de riego, considera la operación simultánea de dos bloques con un caudal total de 28,1 m³/h, se determinó una Altura Dinámica Total (ADT) de 32,2 mca. Este valor incluye la altura geodésica del sistema, las pérdidas por fricción en los ramales principales, las pérdidas menores en accesorios y equipos del cabezal, además de la presión mínima necesaria para el funcionamiento adecuado de los goteros.

Sin embargo, las mediciones de presión realizadas en condiciones reales del sistema evidencian que la presión a la salida de la bomba es de aproximadamente 22.4 mca, mientras que en la entrada del bloque más lejano se registra una presión de 6.6 mca. Esta condición genera una caída real de presión de 15.8 mca, lo que indica que está operando con una presión inferior al mínimo recomendado para los emisores.

La comparación entre los 32.2 mca y los 22.4 mca medidos en campo evidencia un déficit de presión significativo en el sistema, el cual explica la insuficiente presión observada en los bloques más alejados. Este comportamiento no se debe exclusivamente a la capacidad nominal de la bomba, sino principalmente al crecimiento progresivo de la red de distribución, al aumento del caudal simultáneo de operación y a las pérdidas acumuladas en los ramales y

accesorios del sistema.

Por lo tanto, se identifica la necesidad de diseñar una solución técnica que permita mejorar la distribución de presión del sistema, mediante un sistema de bombeo en serie que ayude a superar la carga que requiere el sistema actualmente .

4.4 Diseño de la propuesta

4.4.1 Requerimientos de la empresa

La recopilación de los requerimientos del cliente se efectuó a partir de la documentación técnica entregada por la administración de la finca y entrevistas no estructuradas, las cuales detallan las necesidades operativas y las expectativas funcionales del sistema de riego (ver Anexo 1). A partir de esta información, se establecieron los requerimientos clave que servirán como base para el proceso de diseño y dimensionamiento del sistema.

- Distribución uniforme de agua y nutrientes.
- Cumplimiento del tiempo de riego.
- Usar el menor espacio posible del cuarto de máquinas.
- Línea principal siempre llena.
- Caudal nominal adecuado (100 m³/h y 40 m³/h).
- Filtración 120 mesh con retro lavado automático.
- Automatización completa del sistema.
- Comunicación efectiva controlador–computador.
- Redes separadas para goteo y duchas.
- Medidor de agua y reguladora de presión por línea.

- Facilitar mantenimiento sin detener el riego.
- Reutilizar equipos funcionales para optimizar costos.

4.4.2 Voz del cliente:

La Voz del Cliente se vincula de manera directa con los requerimientos definidos por el usuario, los cuales se detallan en el apartado 4.4.1. Estos requerimientos representan las necesidades operativas, expectativas técnicas y criterios de desempeño que la finca considera indispensables para el adecuado funcionamiento del sistema de riego.

4.4.3 Vos del ingeniero:

La Voz del Cliente se convierte en la Voz del Ingeniero a través del análisis realizado en la Casa de la Calidad (Anexo 2). En este proceso se determina la ponderación correspondiente a los requisitos de diseño, permitiendo establecer cuáles especificaciones técnicas resultan más relevantes para el sistema. A partir de esta priorización, se identifica que el factor con mayor peso es el costo, tal como se evidencia en la siguiente tabla, seguido por otros criterios que orientan las decisiones de diseño y optimización del proyecto.

Tabla 15.

Especificaciones técnicas del sistema de riego

Cliente: Falcon Farms Proyecto: Sistema de riego Fecha: 28/11/2025				
ESPECIFICACIONES TÉCNICAS				
Concepto	Año	Propone	R/D	Descripción
Costo	2025	C	R	Minimizar costos mediante uso eficiente de equipos y materiales.
Caudal	2025	C	R	Garantizar entre 100 m ³ /h para goteo y 40 m ³ /h según la demanda.
Presión	2025	C	R	Mantener presión estable en la red para asegurar el funcionamiento de los emisores.
Área	2025	I	R	Ocupar la menor área posible
Tiempo de riego	2025	C	R	Cumplir el tiempo de riego programado para cada sector.
Filtración	2025	C	R	Implementar filtración mínima de 120 mesh (aprox. 125 µm).
Fácil de usar	2025	C	R	Mantener una interfaz amigable con el usuario.
Nivel de Automatización	2025	C	R	Control automático de bombas, válvulas y sistema de fertirriego.
Uniformidad	2025	C	R	Lograr uniformidad de aplicación de agua y nutrientes $\geq 90\%$.
Mantenimiento	2025	C	R	Permitir mantenimientos sencillos
Seguridad	2025	C+I	R	Cumplir nivel de seguridad funcional mínimo.
Medidor de caudal	2025	C	R	Instalar medidores de caudal..
Propone: C = Cliente, I = Ingeniería			Parámetro: R = Requerimiento, D = Deseo	

4.5 Selección de alternativas

4.5.1 Diagramas funcionales

Estos diagramas determinan el funcionamiento del sistema de riego por medio de los diferentes niveles 0, 1 y 2.

El nivel 0 nos muestra el funcionamiento básico del sistema donde la cual al ser accionada por una señal energía e ingreso del agua de riego atraviesa por todo el proceso que involucra filtrado, fertilización si es necesario y se llega al riego de todos los cultivos de manera uniforme.

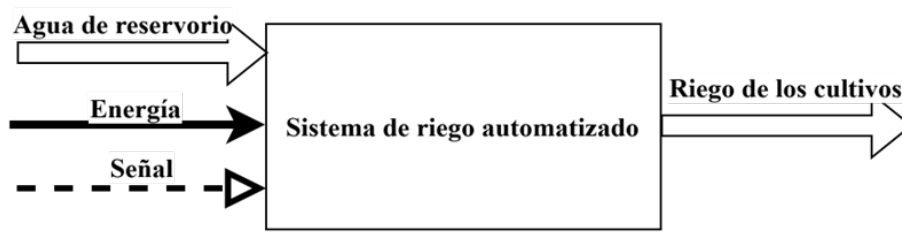


Figura 13.

Diagrama de funciones Nivel 0

Con el nivel 1 se tiene en cuenta la programación de la cantidad de agua a regarse por cada bloque, el encendido de las diferentes bombas, las cuales permiten el paso del agua por los filtros, la distribución a los taques de fertirriego, hasta tener como resultado la distribución uniforme del agua hacia distintas variedades de flores.

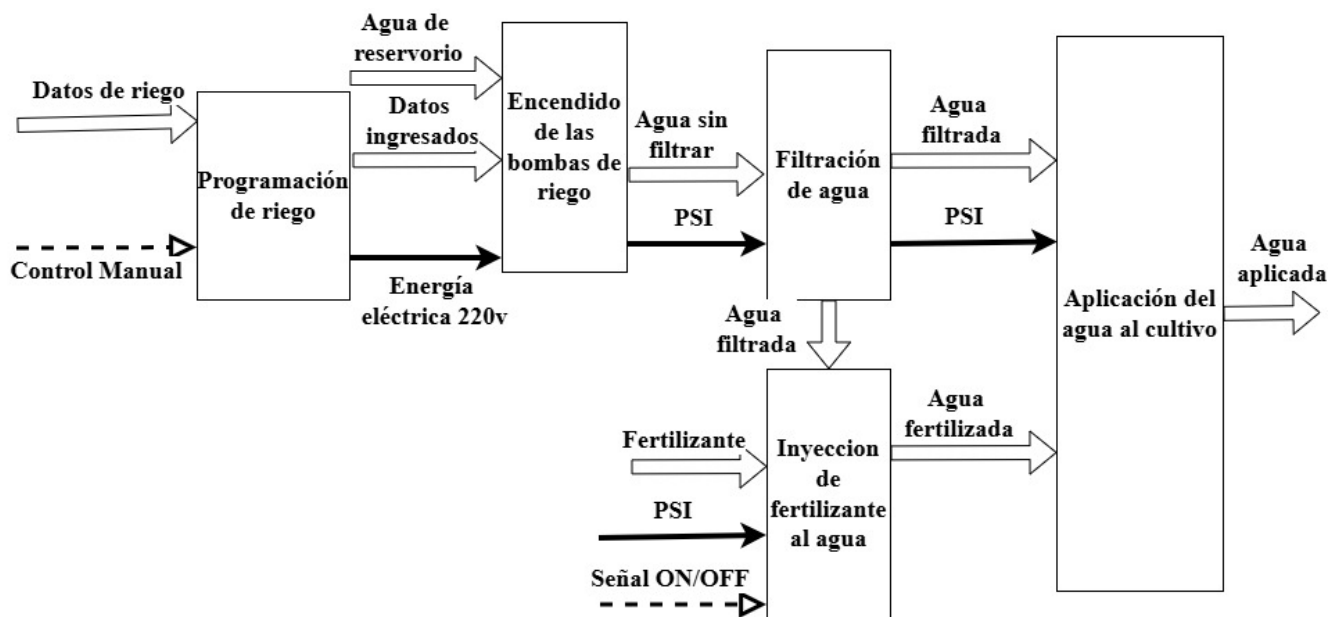


Figura 14.
Diagrama de funciones Nivel 1

Para el nivel 2, se detalla el diagrama funcional del nivel 1 con el objetivo de identificar y comprender las funciones más relevantes que permiten el correcto funcionamiento del sistema de riego. En este nivel, se incorporan funciones esenciales como la revisión del nivel de agua del reservorio, que garantiza la disponibilidad del recurso hídrico antes del arranque del sistema, y la programación de riego, donde se establecen las condiciones de operación. A partir de ello, el encendido de las bombas que impulsa al agua hacia el sistema, permitiendo su ingreso al módulo de filtración, donde además de la retención de sedimentos, se controla la presión diferencial para activar el retrolavado cuando el filtro presenta problemas.

De forma complementaria, el sistema de fertirriego realiza la preparación y dosificación del fertilizante, integrándolo a la línea principal de riego mediante señal de control adecuada. Finalmente, la selección de bloques y la aplicación del agua al cultivo permiten distribuir el caudal requerido hacia los sectores correspondientes.

Modulo	Color
1	
2	
3	
4	

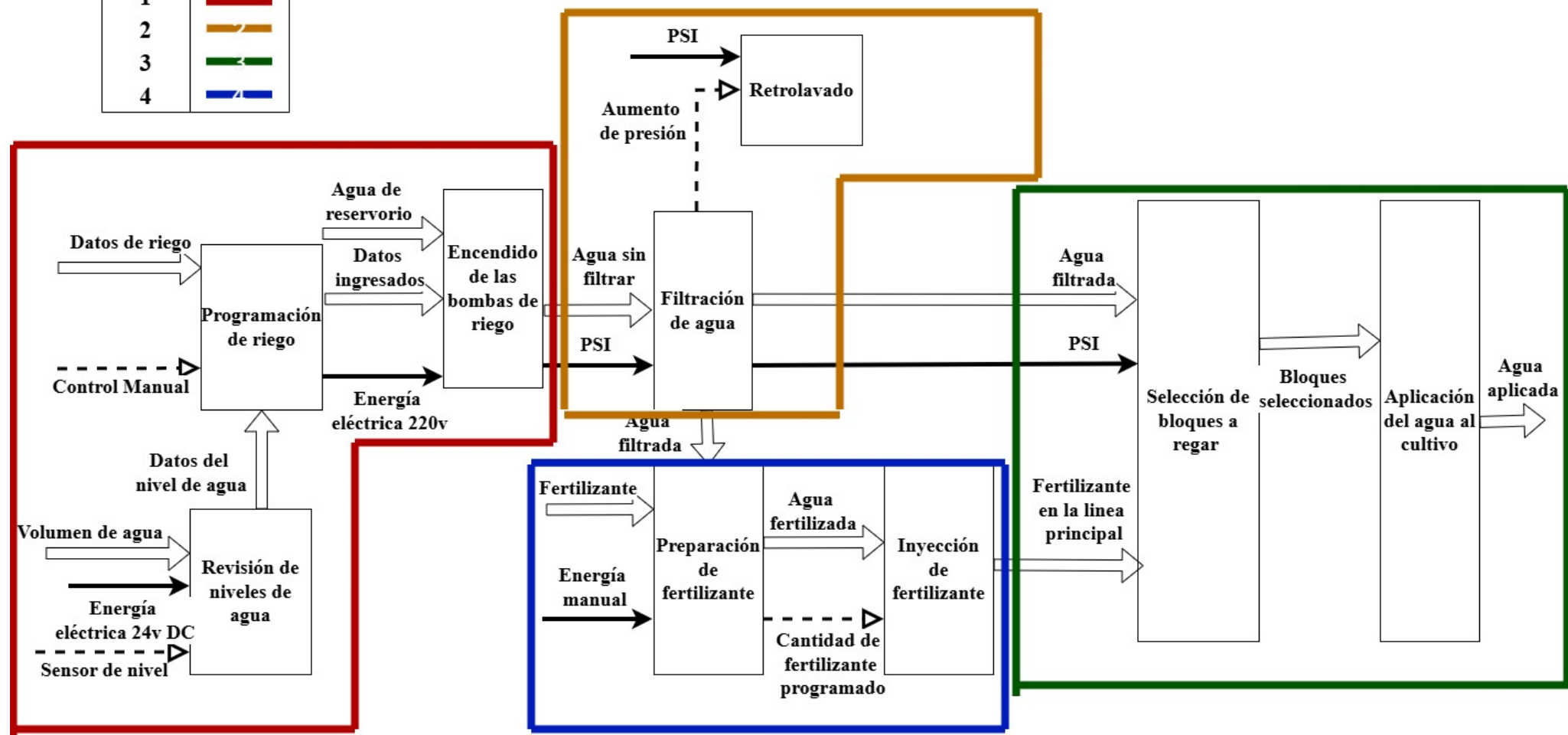


Figura 15.
Diagrama de funciones Nivel 2

4.6 Análisis modular

A partir del diagrama de funciones del nivel 2, se realiza el análisis modular de los 4 módulos, siendo el Módulo 1: control del sistema, el Módulo 2: Sistema de filtros, el Módulo 3: Sistema de fertirrigación y el Módulo 4: Distribución y aplicación de riego.

4.6.1 Módulo 1: Control de riego

Este módulo tiene las funciones de revisión de niveles de agua, programación del riego y encendido de bombas.

4.6.1.1 Análisis de funciones módulo 1

Revisión de los niveles de agua

- **Sensor de nivel tipo flotador/boya (ON/OFF)**

El nivel de agua se controla mediante un sensor (ON/OFF) tipo boya, como se muestra en la figura 16, sin la necesidad de operadores. Con sus ventajas y desventajas en la tabla 16.



Figura 16.
Sensor de nivel tipo boya

Tabla 16.

Ventajas y desventajas del sensor de nivel tipo boya

Ventajas	Desventajas
Bajo costo de adquisición Tecnología simple y robusta	contacto directo con el agua Puede verse afectado por suciedad o incrustaciones

Fuente: Elaboración propia.

■ Visual

Un operario revisa que los niveles de agua sean los adecuados para iniciar el funcionamiento del sistema, como se ve en la figura 17, con las respectivas ventajas y desventajas en la tabla 17.



Figura 17.

Revisión visual

Tabla 17.

Ventajas y desventajas de la inspección visual del nivel de agua

Ventajas	Desventajas
No requiere equipos ni sensores Costo de implementación nulo Facilidad de aplicación inmediata	Alta dependencia del operador No permite monitoreo continuo Posibles errores humanos

Fuente: Elaboración propia.

Programación del riego

Las opciones que se tuvieron en cuenta para la programación fueron un fertikit y la de un PLC más una pantalla HMI para su respectiva manipulación.

■ **Rain Bird TM2**

Controlador modular especializado en riego agrícola, robusto, de configuración intuitiva y costo efectivo para sistemas de fertirrigación de escala media, como se muestra en la figura 18 y sus ventajas y desventajas en la tabla 18.



Figura 18.
Rain Bird TM2

Tabla 18.
Análisis Rain Bird TM2 para Fertirrigación

Ventajas	Desventajas
Costo menor que un PLC	Limitado menos zonas
Configuración simple, sin programación compleja	Flexibilidad de programación reducida
Diseño específico para aplicaciones de riego	Comunicaciones industriales básicas
Integración sencilla con fertikits	software y hardware propietario

■ PLC mas pantalla HMI

Sistema de control programable utilizado en la automatización y el control de motores, válvulas, actuadores, entre otros [53], como se muestra en la figura 19, así como sus ventajas y desventajas en la tabla 19



Figura 19.
PLC

Tabla 19.
Ventajas y desventajas del sistema PLC + HMI

Ventajas	Desventajas
Alta flexibilidad y posibilidad de expansión del sistema	Complejidad al programar
Integración con sistemas de control	Requiere personal capacitado
Supervisión y ajuste en tiempo real mediante HMI	-

Fuente: Elaboración propia.

Sistema de bombeo

Las opciones que se consideraron para el sistema de bombeo fueron una bomba centrífuga y una bomba de embolo.

■ Bombas centrifugas

Es un equipo hidráulico que transfiere energía al fluido mediante un impulsor giratorio, convirtiendo energía mecánica en energía cinética [54], cuenta con una entrada y una salida como se aprecia en la figura 20y sus respectivas ventajas y desventajas en la tabla 20.



Figura 20.
Bomba centrífuga

Tabla 20.

Ventajas y desventajas de la bomba centrífuga

Ventajas	Desventajas
Adecuada para caudales grandes	Menor eficiencia ante caudales bajos
Facil mantenimiento	Sensible a variaciones de presión
Amplio uso en sistemas de riego	No adecuada para presiones muy altas

Fuente: Elaboración propia.

■ Bombas de embolo

Es una bomba de desplazamiento positivo que impulsa el fluido mediante el movimiento alternativo de un pistón dentro de un cilindro, generando caudal a altas presiones [55], cuenta con una entrada y una salida como se aprecia en la figura 21 y sus respectivas ventajas y desventajas en la tabla 21.

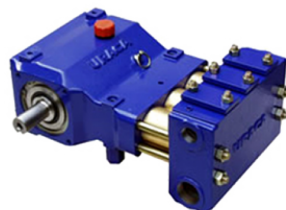


Figura 21.
Bomba de embolo

Tabla 21.

Ventajas y desventajas de la bomba de émbolo

Ventajas	Desventajas
Genera altas presiones de operación	Caudales limitados
Caudal independiente de la presión	Complejidad mecánica
Alta precisión	Costo y mantenimiento elevados

Fuente: Elaboración propia.

4.6.1.2 Análisis de soluciones módulo 1

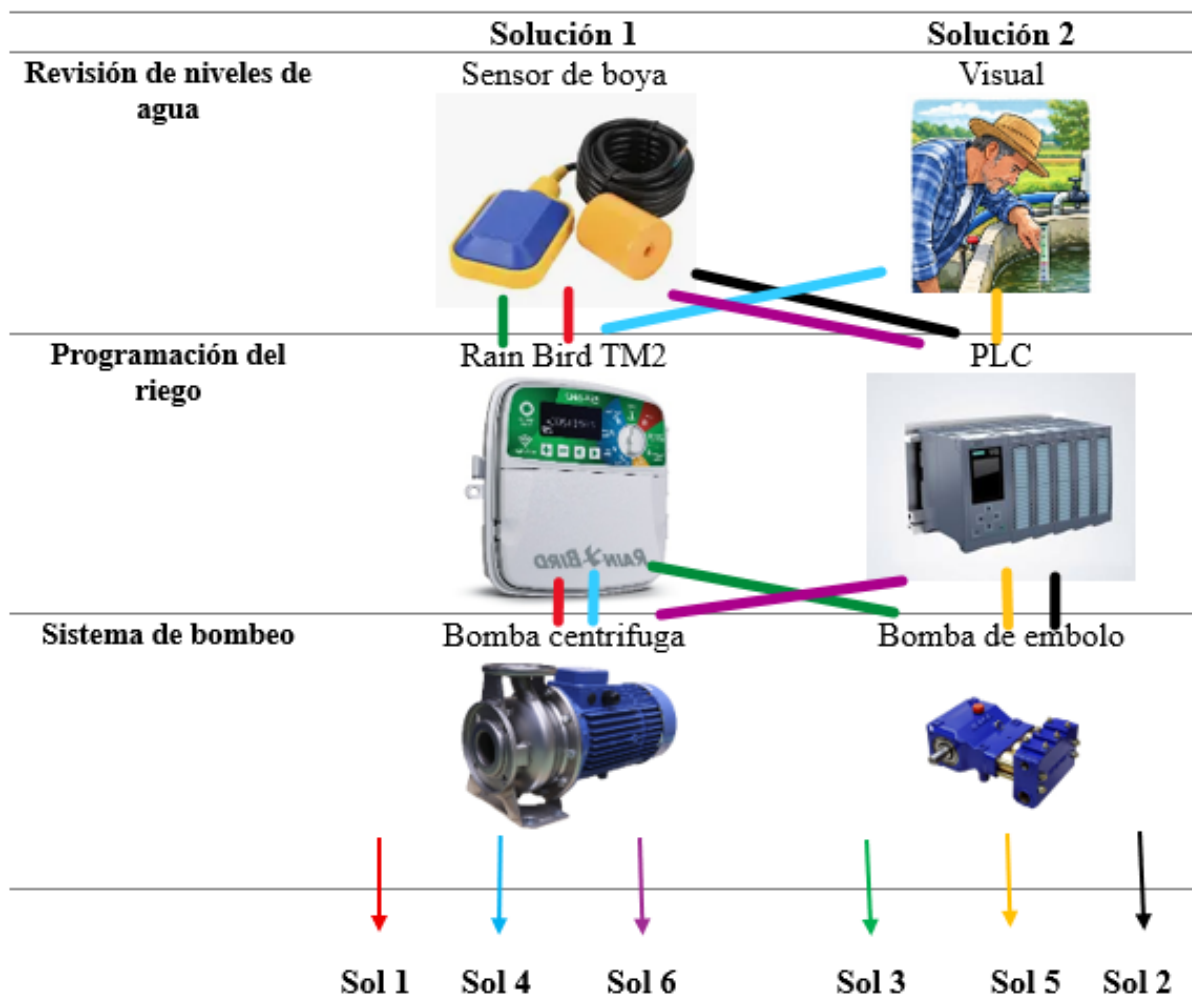


Figura 22.

Soluciones módulo 1

4.6.1.3 Evaluación y selección de alternativas

Para la selección de alternativas se realiza una evaluación en base a las ponderaciones mostradas en las especificaciones técnicas de la tabla 13, Donde, se consideran relevantes para este módulo son:

- **Costo:** el costo total de los materiales, equipos y componentes, deben ser alternativas económicamente viables.
- **Presión:** se debe tener la presión de operación requerida.
- **Tiempo de riego:** el tiempo debe cumplir las necesidades del cultivo.
- **Caudal:** el caudal suministrado por cada alternativa debe satisfacer la demanda de agua del sistema.
- **Nivel de automatización:** se analizó el grado de automatización que requiere el sistema de riego.
- **Seguridad:** mantener condiciones de seguridad durante la operación y el mantenimiento del sistema de riego para minimizar los riesgos.
- **Control de agua por línea:** se analizó la capacidad del sistema para regular y controlar la presión y la cantidad de agua por línea.
- **Demanda:** debe haber disponibilidad de materiales en el mercado local para sus mantenimientos.
- **Número de acciones:** la simplicidad en la operación del sistema se considera mediante el número de acciones del usuario.
- **Disolución:** debe tener la capacidad para distribuir el agua y el fertilizante uniformemente.
- **Área:** se consideró la superficie que el sistema deberá ocupar.

En la tabla 22, se muestra la evaluación y valoración de los criterios del módulo 1.

Tabla 22.

Evaluación de criterios módulo 1

Criterio	Costo	Presión	Tiempo de riego	Caudal	Nivel de auto.	Norma ISO	Control de agua por línea	Demanda	Número de acciones	Disolución	Área	Suma+1	Pon.
Costo		1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	11	17 %
Presión	0		1	1	1	1	1	1	1	1	1	10	15 %
Tiempo riego	0	0		1	1	1	1	1	1	1	1	9	14 %
Caudal	0	0	0		1	1	1	1	1	1	1	8	12 %
Nivel auto.	0	0	0	0		1	1	1	1	1	1	7	11 %
Norma ISO	0	0	0	0	0		1	1	1	1	1	6	9 %
Control línea	0	0	0	0	0	0		1	1	1	1	5	8 %
Demanda	0	0	0	0	0	0	0		1	1	1	4	6 %
N. acciones	0	0	0	0	0	0	0	0		1	1	3	5 %
Disolución	0	0	0	0	0	0	0	0	0		1	2	3 %
Área	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		1	2 %
Total												66	100 %

Las Tablas 22, 23, 24, 25, 26, 27, 28, 29, 30, 31 y 32 presentan las alternativas de solución evaluadas para el módulo del sistema de riego, considerando los criterios más relevantes definidos en este estudio: costo, presión, tiempo de riego, caudal, nivel de automatización, seguridad, control de agua por línea, demanda, número de acciones, disolución y área. Estos criterios permitieron analizar comparativamente el desempeño de cada alternativa, con el fin de seleccionar la opción que mejor se ajusta a los requerimientos técnicos y operativos del sistema propuesto.

Tabla 23.

Evaluación del criterio “Costo”

Costo	Sol. 1	Sol. 2	Sol. 3	Sol. 4	Sol. 5	Sol. 6	$\Sigma + 1$	Pond. (%)
Sol. 1		1	1	0	1	1	5	23,81
Sol. 2	0		1	0	0	1	3	14,29
Sol. 3	0	0		0	0	0	1	4,76
Sol. 4	1	1	1		0,5	0	4,5	21,43
Sol. 5	0	1	1	0,5		0	3,5	16,67
Sol. 6	0	0	1	1	1		4	19,05
Suma							21	100
Sol. 1 > Sol. 4 > Sol. 6 > Sol. 5 > Sol. 2 > Sol. 3								

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 24.

Evaluación del criterio “Presión”

Presión	Sol. 1	Sol. 2	Sol. 3	Sol. 4	Sol. 5	Sol. 6	$\Sigma + 1$	Pond. (%)
Sol. 1		0,5	1	1	1	1	5,5	26,19
Sol. 2	0,5		0,5	0	0,5	0	2,5	11,90
Sol. 3	0	0,5		0	0,5	0	2	9,52
Sol. 4	0	1	1		0,5	0	3,5	16,67
Sol. 5	0	0,5	0,5	0,5		0	2,5	11,90
Sol. 6	0	1	1	1	1		5	23,81
Suma							21	100
Sol. 1 > Sol. 6 > Sol. 4 > Sol. 2 = Sol. 5 > Sol. 3								

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 25.

Evaluación del criterio “Tiempo de riego”

Tiempo de riego	Sol. 1	Sol. 2	Sol. 3	Sol. 4	Sol. 5	Sol. 6	$\Sigma + 1$	Pond. (%)
Sol. 1		1	1	0,5	1	0,5	5	23,81
Sol. 2	0		0,5	0	0,5	0,5	2,5	11,90
Sol. 3	0	0,5		0	0,5	0	2	9,52
Sol. 4	0,5	1	1		1	0,5	5	23,81
Sol. 5	0	0,5	0,5	0		0	2	9,52
Sol. 6	0,5	0,5	1	0,5	1		4,5	21,43
Sol. 1 = Sol. 4 > Sol. 6 > Sol. 2 > Sol. 3 = Sol. 5								

Fuente: Elaboración propia.**Tabla 26.**

Evaluación del criterio “Caudal”

Caudal	Sol. 1	Sol. 2	Sol. 3	Sol. 4	Sol. 5	Sol. 6	$\Sigma + 1$	Pond. (%)
Sol. 1		0,5	1	0,5	1	0,5	4,5	21,43
Sol. 2	0,5		0,5	0	0,5	0	2,5	11,90
Sol. 3	0	0,5		0	0,5	0	2	9,52
Sol. 4	0,5	1	1		1	1	5,5	26,19
Sol. 5	0	0,5	0,5	0		0	2	9,52
Sol. 6	0,5	1	1	0	1		4,5	21,43
Sol. 4 > Sol. 1 = Sol. 6 > Sol. 2 > Sol. 3 = Sol. 5								

Fuente: Elaboración propia.**Tabla 27.**

Evaluación del criterio “Nivel de automatización”

Nivel de automatización	Sol. 1	Sol. 2	Sol. 3	Sol. 4	Sol. 5	Sol. 6	$\Sigma + 1$	Pond. (%)
Sol. 1		1	0,5	1	1	1	5,5	26,19
Sol. 2	0		0	0	1	0,5	2,5	11,90
Sol. 3	0,5	1		1	1	1	5,5	26,19
Sol. 4	0	1	0		1	0,5	3,5	16,67
Sol. 5	0	0	0	0		0	1	4,76
Sol. 6	0	0,5	0	0,5	1		3	14,29
Sol. 1 = Sol. 3 > Sol. 4 > Sol. 6 > Sol. 2 > Sol. 5								

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 28.

Evaluación del criterio “Norma ISO”

Norma ISO	Sol. 1	Sol. 2	Sol. 3	Sol. 4	Sol. 5	Sol. 6	$\Sigma + 1$	Pond. (%)
Sol. 1		1	1	0,5	1	1	5,5	26,19
Sol. 2	0		0,5	0	0,5	0	2	9,52
Sol. 3	0	0,5		0	0,5	0	2	9,52
Sol. 4	0,5	1	1		1	0,5	5	23,81
Sol. 5	0	0,5	0,5	0		0	2	9,52
Sol. 6	0	1	1	0,5	1		4,5	21,43
Sol. 1 > Sol. 4 > Sol. 6 > Sol. 2 = Sol. 3 = Sol. 5								

Fuente: Elaboración propia.**Tabla 29.**

Evaluación del criterio “Control de agua por línea”

Control de agua por línea	Sol. 1	Sol. 2	Sol. 3	Sol. 4	Sol. 5	Sol. 6	$\Sigma + 1$	Pond. (%)
Sol. 1		1	0,5	1	1	1	5,5	26,19
Sol. 2	0		0	0	1	0,5	2,5	11,90
Sol. 3	0,5	1		1	1	1	5,5	26,19
Sol. 4	0	1	0		1	0,5	3,5	16,67
Sol. 5	0	0	0	0		0	1	4,76
Sol. 6	0	0,5	0	0,5	1		3	14,29
Sol. 1 = Sol. 3 > Sol. 4 > Sol. 6 > Sol. 2 > Sol. 5								

Fuente: Elaboración propia.**Tabla 30.**

Evaluación del criterio “Demanda”

Demanda	Sol. 1	Sol. 2	Sol. 3	Sol. 4	Sol. 5	Sol. 6	$\Sigma + 1$	Pond. (%)
Sol. 1		1	1	0,5	1	1	5,5	26,19
Sol. 2	0		0	0	0,5	0	1,5	7,14
Sol. 3	0	1		0	1	1	4	19,05
Sol. 4	0,5	1	1		1	0	4,5	21,43
Sol. 5	0	0,5	0	0		0	1,5	7,14
Sol. 6	0	1	0	1	1		4	19,05
Sol. 1 > Sol. 4 > Sol. 3 = Sol. 6 > Sol. 2 = Sol. 5								

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 31.

Evaluación del criterio “Número de acciones”

Número de acciones	Sol. 1	Sol. 2	Sol. 3	Sol. 4	Sol. 5	Sol. 6	$\Sigma + 1$	Pond. (%)
Sol. 1		1	1	0,5	1	1	5,5	26,19
Sol. 2	0		0	0	0,5	0,5	2	9,52
Sol. 3	0	1		0,5	1	1	4,5	21,43
Sol. 4	0,5	1	0,5		1	1	5	23,81
Sol. 5	0	0,5	0	0		0,5	2	9,52
Sol. 6	0	0,5	0	0	0,5		2	9,52
Sol. 1 > Sol. 4 > Sol. 3 > Sol. 2 = Sol. 5 = Sol. 6								

Fuente: Elaboración propia.**Tabla 32.**

Evaluación del criterio “Disolución”

Disolución	Sol. 1	Sol. 2	Sol. 3	Sol. 4	Sol. 5	Sol. 6	$\Sigma + 1$	Pond. (%)
Sol. 1		1	1	0,5	1	0,5	5	23,81
Sol. 2	0		0,5	0	0,5	0	2	9,52
Sol. 3	0	0,5		0	0,5	0	2	9,52
Sol. 4	0,5	1	1		1	0,5	5	23,81
Sol. 5	0	0,5	0,5	0		0	2	9,52
Sol. 6	0,5	1	1	0,5	1		5	23,81
Sol. 1 = Sol. 4 = Sol. 6 > Sol. 2 = Sol. 3 = Sol. 5								

Fuente: Elaboración propia.**Tabla 33.**

Evaluación del criterio “Área”

Área	Sol. 1	Sol. 2	Sol. 3	Sol. 4	Sol. 5	Sol. 6	$\Sigma + 1$	Pond. (%)
Sol. 1		0	1	0,5	1	1	4,5	21,43
Sol. 2	1		0,5	0	1	0,5	4	19,05
Sol. 3	0	0,5		0,5	0	0	2	9,52
Sol. 4	0,5	1	0,5		1	1	5	23,81
Sol. 5	0	0,5	1	0		0,5	3	14,29
Sol. 6	0	0	1	0	0,5		2,5	11,90
Sol. 4 > Sol. 1 > Sol. 2 > Sol. 5 > Sol. 6 > Sol. 3								

Fuente: Elaboración propia.

En la Tabla 34 se presentan las conclusiones correspondientes al Módulo 1, donde, a partir del análisis realizado, se determina que la Solución 1 es la opción más adecuada para el mismo módulo.

Tabla 34.

Evaluación global y priorización de alternativas

Alt.	Cos.	Pres.	T.R.	Cau.	N.A.	ISO	C.L.	Dem.	N.Acc.	Dis.	Ar.	Pond.	Pri.
Sol. 1	3,97	3,97	3,25	2,60	2,78	2,38	1,98	1,59	1,19	0,72	0,32	24,75	1
Sol. 2	2,38	1,80	1,62	1,44	1,26	0,87	0,90	0,43	0,43	0,29	0,29	11,72	6
Sol. 3	0,79	1,44	1,30	1,15	2,78	0,87	1,98	1,15	0,97	0,29	0,14	12,88	5
Sol. 4	3,57	2,53	3,25	3,17	1,77	2,16	1,26	1,30	1,08	0,72	0,36	21,18	3
Sol. 5	2,78	1,80	1,30	1,15	0,51	0,87	0,36	0,43	0,43	0,29	0,22	10,14	4
Sol. 6	3,17	3,61	2,92	2,60	1,52	1,95	1,08	1,15	0,43	0,72	0,18	19,34	2
Total												100	

Nota: Alt.=Alternativa; Cos.=Costo; Pres.=Presión; T.R.=Tiempo de riego; Cau.=Caudal; N.A.=Nivel de automatización; ISO=Norma ISO; C.L.=Control de agua por línea; Dem.=Demanda; N.Acc.=Número de acciones; Dis.=Disolución; Ar.=Área; Pri.=Prioridad.

Fuente: Elaboración propia.

4.6.2 Módulo 2: Fertilización

Este módulo tiene las funciones de preparación de fertilizante y la inyección del mismo.

4.6.2.1 Análisis de funciones Módulo 2

Preparación del fertilizante

Se consideran las opciones de un tanque de mezcla automático y la mezcla manual.

■ Tanque de mezcla automático

Un tanque de mezcla automático es un equipo diseñado para combinar insumos de forma controlada y uniforme, mediante dosificación programada, reduciendo la intervención manual y mejorando la repetibilidad del proceso, como se indica en la figura 23 y sus ventajas y desventajas en la tabla 35.



Figura 23.
Tanque de mezcla automático

Tabla 35.

Ventajas y desventajas del tanque de mezcla automático

Ventajas	Desventajas
Dosificación precisa	Gran inversión inicial
Homogeneidad de la solución	Requiere energía eléctrica
Reduce mano de obra y errores	Necesita mantenimiento técnico

■ Mezcla manual

La mezcla manual es un proceso en el que los productos se mezclan por un operario, utilizando herramientas básicas, como se puede ver en la figura 24 y sus ventajas y desventajas en la tabla 36.



Figura 24.
Mezcla manual

Tabla 36.

Ventajas y desventajas de la mezcla manual

Ventajas	Desventajas
Bajo costo de implementación	Menor precisión en la dosificación
No requiere energía eléctrica	Alta dependencia del operario
Fácil de ejecutar y adaptar	Variabilidad en la homogeneidad de la mezcla

Inyección del fertilizante

Se consideraron las opciones de un fertikit y de una bomba dosificadora.

■ Fertikit

Equipo que permite preparar y dosificar soluciones de fertilización de forma controlada, combinando dispositivos hidráulicos y de regulación para asegurar una mezcla constante [56], como se ve en la figura 25 y sus ventajas y desventajas en la tabla 37.



Figura 25.
Fertikit

Tabla 37.

Ventajas y desventajas del fertikit

Ventajas	Desventajas
Alta precisión en la dosificación	Costo mayor que la mezcla manual
Funcionamiento automático o semiautomático	Requiere calibración periódica
Reduce errores humanos en la preparación	Dependencia de componentes hidráulicos

■ **Sistema de inyección con bomba dosificadora**

Conjunto de equipos que permite mezclar y dosificar líquidos de manera controlada, mediante válvulas y reguladores, asegurando uniformidad en el proceso [57]. Como se puede ver en la figura 26, y sus respectivas ventajas y desventajas en la tabla 38.



Figura 26.

Sistema con bomba dosificadora

Tabla 38.

Ventajas y desventajas del sistema automático de dosificación

Ventajas	Desventajas
Alta precisión y repetibilidad en la dosificación	Alta inversión inicial
Permite control individual de cada insumo	Requiere calibración técnica periódica
Reduce errores humanos en la preparación	Mayor complejidad operativa

4.6.2.2 Alternativas de solución Módulo 2

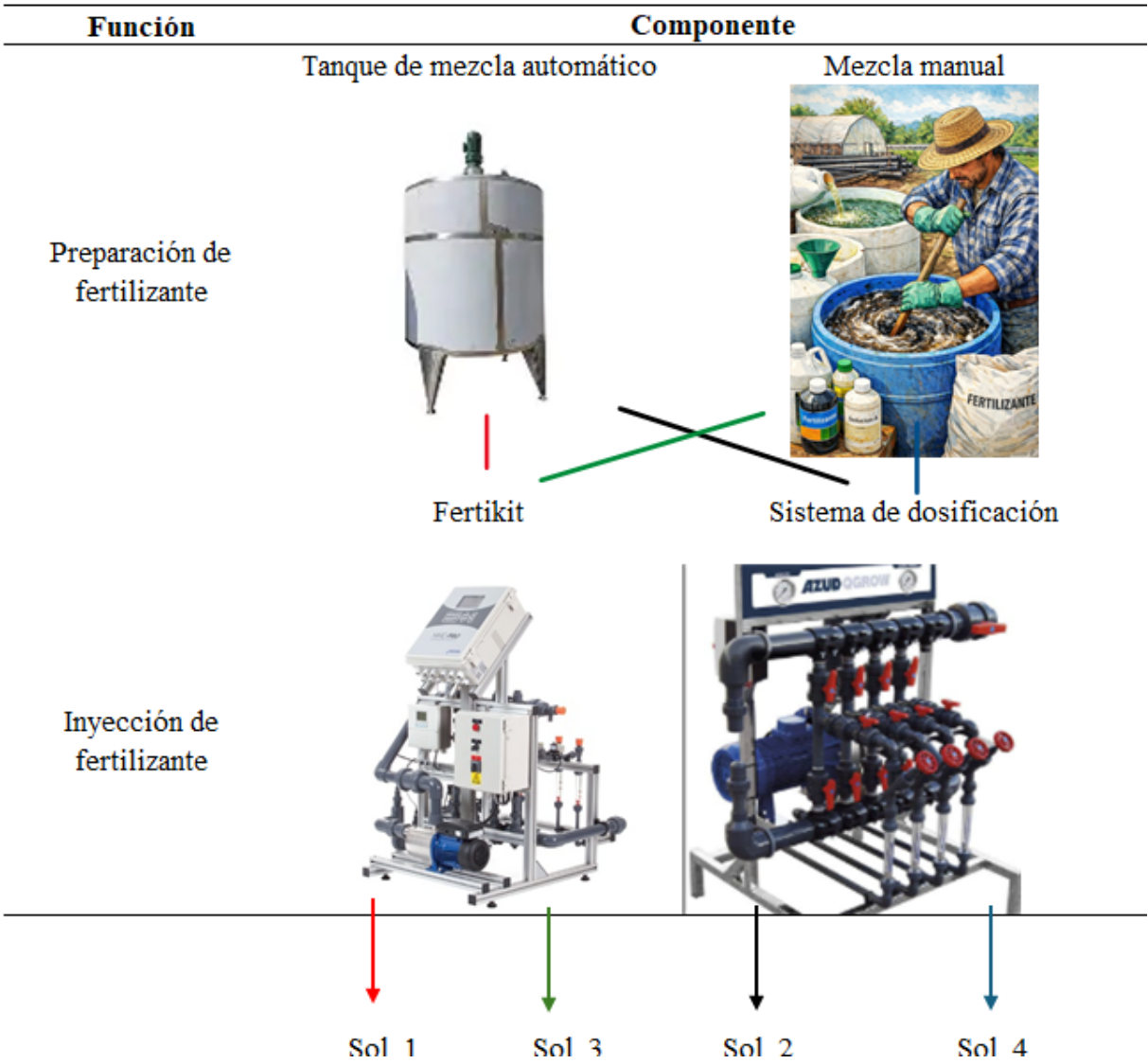


Figura 27.
Alternativas de solución Módulo 2

4.6.2.3 Evaluación y selección de alternativas Módulo 2

Se consideran relevantes para este módulo los siguientes:

- **Costo:** el costo total de equipos, materiales y componentes debe ser económicamente viable.
- **Presión:** se debe contar con la presión de operación necesaria para el correcto funciona-

miento.

- **Tiempo de riego:** el tiempo de operación debe cubrir las necesidades hídricas del cultivo.
- **Caudal:** el caudal suministrado debe satisfacer la demanda de agua del sistema.
- **Nivel de automatización:** se requiere un nivel de automatización acorde a las necesidades del sistema.
- **Seguridad:** se deben mantener condiciones seguras durante la operación y el mantenimiento, minimizando riesgos.
- **Control de agua por línea:** el sistema debe permitir regular la presión y la cantidad de agua por cada línea.
- **Demanda:** debe existir disponibilidad de materiales y repuestos en el mercado local para su mantenimiento.
- **Número de acciones:** la operación debe ser simple, reduciendo la cantidad de acciones requeridas por el usuario.
- **Disolución:** se debe garantizar una distribución uniforme del agua y del fertilizante.
- **Área:** el sistema debe ocupar una superficie acorde a las condiciones del lugar de instalación.

En la tabla 39, se muestra la evaluación y valoración de los criterios del módulo 1.

Tabla 39.

Evaluación de criterios módulo 1

Criterio	Costo	Presión	Tiempo de riego	Caudal	Nivel de auto.	Norma ISO	Control de agua por línea	Demanda	Número de acciones	Disolución	Área	Suma+1	Pon.
Costo		1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	11	17 %
Presión	0		1	1	1	1	1	1	1	1	1	10	15 %
Tiempo riego	0	0		1	1	1	1	1	1	1	1	9	14 %
Caudal	0	0	0		1	1	1	1	1	1	1	8	12 %
Nivel auto.	0	0	0	0		1	1	1	1	1	1	7	11 %
Norma ISO	0	0	0	0	0		1	1	1	1	1	6	9 %
Control línea	0	0	0	0	0	0		1	1	1	1	5	8 %
Demanda	0	0	0	0	0	0	0		1	1	1	4	6 %
N. acciones	0	0	0	0	0	0	0	0		1	1	3	5 %
Disolución	0	0	0	0	0	0	0	0	0		1	2	3 %
Área	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		1	2 %
Total												66	100 %

Fuente: Elaboración propia.

Las Tablas 39, 40, 41, 42, 43, 44, 45, 46, 47, 48 y 49 muestran la evaluación y valoración de los criterios correspondientes al módulo 2.

Tabla 40.

Evaluación del criterio “Costo”

Costo	Sol. 1	Sol. 2	Sol. 3	Sol. 4	$\Sigma + 1$	Pond. (%)
Sol. 1		0	0	0	1	10,00
Sol. 2	1		0,5	0	2,5	25,00
Sol. 3	1	0,5		0	2,5	25,00
Sol. 4	1	1	1		4	40,00
Suma					10	100
Sol. 4 > Sol. 2 = Sol. 3 > Sol. 1						

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 41.

Evaluación del criterio “Presión”

Presión	Sol. 1	Sol. 2	Sol. 3	Sol. 4	$\Sigma + 1$	Pond. (%)
Sol. 1		1	0,5	1	3,5	35,00
Sol. 2	0		0	0,5	1,5	15,00
Sol. 3	0,5	1		1	3,5	35,00
Sol. 4	0	0,5	0		1,5	15,00
Suma					10	100
Sol. 1 = Sol. 3 > Sol. 2 = Sol. 4						

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 42.

Evaluación del criterio “Tiempo de riego”

Tiempo de riego	Sol. 1	Sol. 2	Sol. 3	Sol. 4	$\Sigma + 1$	Pond. (%)
Sol. 1		0,5	1	1	3,5	35,00
Sol. 2	0,5		1	1	3,5	35,00
Sol. 3	0	0		0,5	1,5	15,00
Sol. 4	0	0	0,5		1,5	15,00
Suma					10	100
Sol. 1 = Sol. 2 > Sol. 3 = Sol. 4						

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 43.

Evaluación del criterio “Caudal”

Caudal	Sol. 1	Sol. 2	Sol. 3	Sol. 4	$\Sigma + 1$	Pond. (%)
Sol. 1		1	0,5	1	3,5	35,00
Sol. 2	0		0	0,5	1,5	15,00
Sol. 3	0,5	1		1	3,5	35,00
Sol. 4	0	0,5	0		1,5	15,00
Suma					10	100
Sol. 1 = Sol. 3 > Sol. 2 = Sol. 4						

Fuente: Elaboración propia.**Tabla 44.**

Evaluación del criterio “Nivel de automatización”

Nivel de automatización	Sol. 1	Sol. 2	Sol. 3	Sol. 4	$\Sigma + 1$	Pond. (%)
Sol. 1		1	1	1	4	40,00
Sol. 2	0		0	1	2	20,00
Sol. 3	0	1		1	3	30,00
Sol. 4	0	0	0		1	10,00
Suma					10	100
Sol. 1 > Sol. 3 > Sol. 2 > Sol. 4						

Fuente: Elaboración propia.**Tabla 45.**

Evaluación del criterio “Norma ISO”

Norma ISO	Sol. 1	Sol. 2	Sol. 3	Sol. 4	$\Sigma + 1$	Pond. (%)
Sol. 1		0,5	1	1	3,5	35,00
Sol. 2	0,5		1	1	3,5	35,00
Sol. 3	0	0		1	2	20,00
Sol. 4	0	0	0		1	10,00
Suma					10	100
Sol. 1 = Sol. 2 > Sol. 3 > Sol. 4						

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 46.

Evaluación del criterio “Control del agua”

Control del agua	Sol. 1	Sol. 2	Sol. 3	Sol. 4	$\Sigma + 1$	Pond. (%)
Sol. 1		0,5	0,5	0,5	2,5	25,00
Sol. 2	0,5		0,5	1	3	30,00
Sol. 3	0,5	0,5		1	3	30,00
Sol. 4	0,5	0	0		1,5	15,00
Suma					10	100
Sol. 2 = Sol. 3 > Sol. 1 > Sol. 4						

Fuente: Elaboración propia.**Tabla 47.**

Evaluación del criterio “Demanda”

Demanda	Sol. 1	Sol. 2	Sol. 3	Sol. 4	$\Sigma + 1$	Pond. (%)
Sol. 1		0	0	0	1	10,00
Sol. 2	1		0,5	0	2,5	25,00
Sol. 3	1	0,5		1	3,5	35,00
Sol. 4	1	1	1		4	40,00
Suma					11	110
Sol. 4 > Sol. 3 > Sol. 2 > Sol. 1						

Fuente: Elaboración propia.**Tabla 48.**

Evaluación del criterio “Número de acciones”

Número de acciones	Sol. 1	Sol. 2	Sol. 3	Sol. 4	$\Sigma + 1$	Pond. (%)
Sol. 1		1	0,5	1	3,5	35,00
Sol. 2	0		0	0,5	1,5	15,00
Sol. 3	0,5	1		0	2,5	25,00
Sol. 4	0	0,5	1		2,5	25,00
Suma					10	100
Sol. 1 > Sol. 3 = Sol. 4 > Sol. 2						

Fuente: Elaboración propia.**Tabla 49.**

Evaluación del criterio “Disolución”

Disolución	Sol. 1	Sol. 2	Sol. 3	Sol. 4	$\Sigma + 1$	Pond. (%)
Sol. 1		0,5	1	1	3,5	35,00
Sol. 2	0,5		1	1	3,5	35,00
Sol. 3	0	0		0,5	1,5	15,00
Sol. 4	0	0	0,5		1,5	15,00
Suma					10	100
Sol. 1 = Sol. 2 > Sol. 3 = Sol. 4						

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 50.

Evaluación del criterio “Área”

Área	Sol. 1	Sol. 2	Sol. 3	Sol. 4	$\Sigma + 1$	Pond. (%)
Sol. 1		0,5	0,5	0,5	2,5	25,00
Sol. 2	0,5		0,5	0,5	2,5	25,00
Sol. 3	0,5	0,5		0,5	2,5	25,00
Sol. 4	0,5	0,5	0,5		2,5	25,00
Suma					10	100
Sol. 1 = Sol. 2 = Sol. 3 = Sol. 4						

Fuente: Elaboración propia.

En la tabla 51 se muestran las conclusiones del módulo 2, donde la solución óptima para el mismo es la solución 1.

Tabla 51.

Evaluación global y priorización de alternativas (Módulo 2)

Alt.	Cos.	Pres.	T.R.	Cau.	N.A.	ISO	C.A.	Dem.	N.Acc.	Dis.	Ar.	Pond.	Pri.
Sol. 1	1,67	5,30	4,27	4,24	4,24	3,18	1,89	0,61	1,91	1,06	0,38	28,93	1
Sol. 2	4,17	2,27	2,65	0,91	0,91	0,53	2,27	1,52	0,68	1,06	0,38	17,34	3
Sol. 3	4,17	5,30	1,14	2,12	1,36	0,30	2,27	2,12	1,14	0,45	0,38	20,75	2
Sol. 4	6,67	2,27	1,14	0,91	0,45	0,15	1,14	2,42	1,14	0,45	0,38	17,12	4
Total												84	

Nota: Cos.=Costo; Pres.=Presión; T.R.=Tiempo de riego; Cau.=Caudal; N.A.=Nivel de automatización; ISO=Norma ISO; C.A.=Control del agua; Dem.=Demanda; N.Acc.=Número de acciones; Dis.=Disolución; Ar.=Área; Pri.=Prioridad (1 = mayor ponderación).

Fuente: Elaboración propia.

4.6.3 Módulo 3: Filtración

El módulo está compuesto por las funciones de filtración del agua y retrolavado.

4.6.3.1 Análisis de funciones módulo 3

Filtración del agua

- **Sistema de filtros de anillos automático**

Permite la retención de sólidos y materia orgánica presentes en el agua, con grados de filtración de hasta aproximadamente 130 micras. Su diseño modular y automatizado contribuye a reducir obstrucciones, limitar pérdidas de carga y favorecer un funcionamiento estable del sistema de riego y presenta integrado un sistema de retrolavado automático [56], como se ve en la figura 28 y sus ventajas y desventajas en la tabla 52.



Figura 28.
Sistema de filtros de anillos automático

- **Filtros de arena**

Realiza la separación de sólidos mediante el paso del agua a través de un lecho filtrante. Es usado como pretratamiento en aguas con carga orgánica o sólidos suspendidos, y puede incorporar retrolavado para restituir la capacidad de filtración, como se ve en la figura 29 y sus ventajas y desventajas en la tabla 53.

Tabla 52.

Ventajas y desventajas del sistema filtros de disco automático

Ventajas	Desventajas
Retención de partículas finas hasta aproximadamente 130 micras. permite ampliaciones del sistema. Necesita mantenimiento periódico de los discos. Funcionamiento automático.	Costo inicial mayor. Dependencia de componentes mecánicos y de control.



Figura 29.
Filtros de arena

Tabla 53.

Ventajas y desventajas del filtro de arena (medio granular)

Ventajas	Desventajas
Retiene materia orgánica y sólidos suspendidos. Buena capacidad de retención. Puede operar como filtración primaria antes de etapas finas.	Requiere retrolavado, con consumo de agua y energía. Ocupa mayor espacio. Necesita control de pérdidas de carga para mantener el desempeño.

■ Filtro de malla

Separa partículas sólidas mediante un elemento filtrante tipo pantalla con abertura definida. Se emplea para retener sólidos en suspensión y como protección de emisores; puede ser manual o automático, según la configuración y el esquema de limpieza.



Figura 30.
Filtros de malla

Tabla 54.
Ventajas y desventajas del filtro de malla

Ventajas	Desventajas
Equipo compacto y de fácil uso.	Menor tolerancia a cargas altas de materia.
Mantenimiento directo.	Requiere seguimiento de pérdida de carga.
Útil como filtración secundaria.	-

Retrolavado

■ Válvula automática

Permite la limpieza del filtro sin intervención del operador, activándose mediante diferencias de presión o temporización [34], como se ve en la figura 31 y sus ventajas y desventajas en la tabla 55.



Figura 31.
Válvula de retrolavado automático

Tabla 55.

Ventajas y desventajas del sistema de retrolavado automático

Ventajas	Desventajas
No requiere intervención constante del operador.	Mayor costo inicial.
Permite que el sistema opere de manera continua.	Dependencia de componentes de control.
Mantiene pérdidas de carga dentro de rangos controlados.	-

■ Válvula de retrolavado manual

Realiza la limpieza del filtro mediante la intervención directa del operador, quien activa válvulas o mecanismos de descarga. Este tipo de retrolavado es utilizado en sistemas de menor complejidad y donde la supervisión operativa es constante, como se ve en la figura 32 y sus ventajas y desventajas en la tabla 56.

**Figura 32.**

Válvula de retrolavado manual

Tabla 56.

Ventajas y desventajas del sistema de retrolavado manual

Ventajas	Desventajas
Menor costo de implementación.	Depende de la disponibilidad del operador.
Sistema simple y de fácil comprensión.	Retrasos en la limpieza del filtro.
No requiere sistemas de control.	Pérdidas de carga prolongadas.
Para sistemas de bajo caudal.	Menor uniformidad del sistema.

4.6.3.2 Alternativas de solución módulo 3

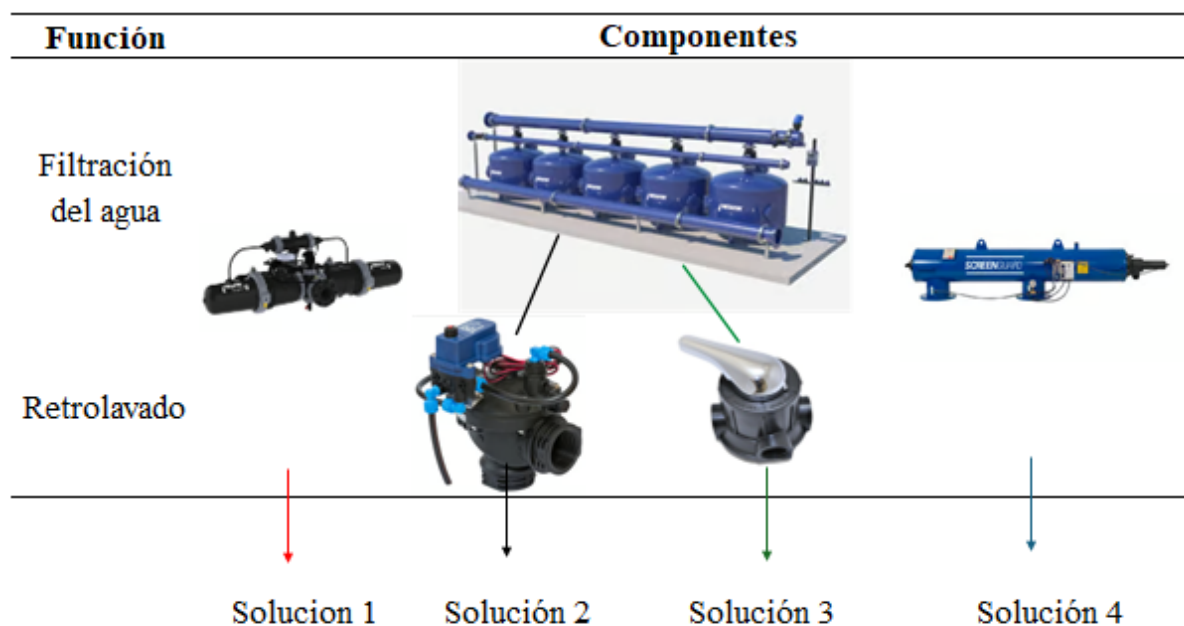


Figura 33.
Alternativas de solución módulo 3

4.6.3.3 Evaluación y Selección de Alternativas Módulo 3

Se consideran importantes para este módulo los siguientes requisitos:

- **Costo:** el costo total de equipos, materiales y componentes debe ser económicamente viable.
- **Presión:** se debe contar con la presión de operación necesaria para el correcto funcionamiento.
- **Tiempo de riego:** el tiempo de operación debe cubrir las necesidades hídricas del cultivo.
- **Caudal:** el caudal suministrado debe satisfacer la demanda de agua del sistema.
- **Nivel de automatización:** se requiere un nivel de automatización acorde a las necesidades del sistema.

- **Filtración:** se deben filtrar partículas de hasta 130 micras.
- **Seguridad:** se deben mantener condiciones seguras durante la operación y el mantenimiento, minimizando riesgos.
- **Demanda:** debe existir disponibilidad de materiales y repuestos en el mercado local para su mantenimiento.
- **Número de acciones:** la operación debe ser simple, reduciendo la cantidad de acciones requeridas por el usuario.
- **Área:** el sistema debe ocupar una superficie acorde a las condiciones del lugar de instalación.

La tabla 57, se muestra la evaluación y valoración de los criterios del Módulo 3.

Tabla 57.

Matriz de comparación de criterios del módulo de distribución

	Costo	Presión	Tiempo de riego	Caudal	Nivel de automatización	Filtración	Norma ISO	Demanda	Número de acciones	Área	$\Sigma + 1$	Pond.
Costo		1	1	1	1	1	1	1	1	1	10	18 %
Presión	0		1	1	1	1	1	1	1	1	9	16 %
Tiempo de riego	0	0		1	1	1	1	1	1	1	8	15 %
Caudal	0	0	0		1	1	1	1	1	1	7	13 %
Nivel de automatización	0	0	0	0		1	1	1	1	1	6	11 %
Filtración	0	0	0	0	0		1	1	1	1	5	9 %
Norma ISO	0	0	0	0	0	0		1	1	1	4	7 %
Demanda	0	0	0	0	0	0	0		1	1	3	5 %
Número de acciones	0	0	0	0	0	0	0	0		1	2	4 %
Área	0	0	0	0	0	0	0	0	0		1	2 %
Total										55	100 %	

Fuente: Elaboración propia.

Las Tablas 58, 59, 60, 61, 62, 63, 64, 65, 66 Y 67 muestran las alternativas de solución propuestas para los criterios más relevantes de este módulo, considerando el costo, la presión de operación, el tiempo de riego, el caudal, el nivel de automatización, la filtración, el cumplimiento de la norma ISO 13849-1, la demanda del sistema, el número de acciones requeridas y el área ocupada, permitiendo una evaluación comparativa entre las diferentes opciones técnicas.

Tabla 58.

Evaluación del criterio “Costo”

Costo	Sol. 1	Sol. 2	Sol. 3	Sol. 4	$\Sigma + 1$	Pond. (%)
Sol. 1		1	1	0	3	30,00
Sol. 2	0		0	0	1	10,00
Sol. 3	0	1		0	2	20,00
Sol. 4	1	1	1		4	40,00
Suma					10	100
Sol. 4 > Sol. 1 > Sol. 3 > Sol. 2						

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 59.

Evaluación del criterio “Presión”

Presión	Sol. 1	Sol. 2	Sol. 3	Sol. 4	$\Sigma + 1$	Pond. (%)
Sol. 1		1	1	1	4	40,00
Sol. 2	0		0,5	1	2,5	25,00
Sol. 3	0	0,5		1	2,5	25,00
Sol. 4	0	0	0		1	10,00
Suma					10	100
Sol. 1 > Sol. 2 = Sol. 3 > Sol. 4						

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 60.

Evaluación del criterio “Tiempo de riego”

Tiempo de riego	Sol. 1	Sol. 2	Sol. 3	Sol. 4	$\Sigma + 1$	Pond. (%)
Sol. 1		0,5	1	0,5	3	30,00
Sol. 2	0,5		0	0,5	3	30,00
Sol. 3	0	0		0	1	10,00
Sol. 4	0,5	0,5	1		3	30,00
Suma					10	100
Sol. 1 = Sol. 2 = Sol. 4 > Sol. 3						

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 61.

Evaluación del criterio “Caudal”

Caudal	Sol. 1	Sol. 2	Sol. 3	Sol. 4	$\Sigma + 1$	Pond. (%)
Sol. 1		0,5	0,5	1	3	30,00
Sol. 2	0,5		0,5	1	3	30,00
Sol. 3	0,5	0,5		1	3	30,00
Sol. 4	0	0	0		1	10,00
Suma					10	100
Sol. 1 = Sol. 2 = Sol. 3 > Sol. 4						

Fuente: Elaboración propia.**Tabla 62.**

Evaluación del criterio “Nivel de automatización”

Nivel de automatización	Sol. 1	Sol. 2	Sol. 3	Sol. 4	$\Sigma + 1$	Pond. (%)
Sol. 1		1	1	1	4	40,00
Sol. 2	0		1	1	3	30,00
Sol. 3	0	0		0,5	1,5	15,00
Sol. 4	0	0	0,5		1,5	15,00
Suma					10	100
Sol. 1 > Sol. 2 > Sol. 3 = Sol. 4						

Fuente: Elaboración propia.**Tabla 63.**

Evaluación del criterio “Filtración”

Filtración	Sol. 1	Sol. 2	Sol. 3	Sol. 4	$\Sigma + 1$	Pond. (%)
Sol. 1		1	1	1	4	40,00
Sol. 2	0		0,5	1	2,5	25,00
Sol. 3	0	0,5		1	2,5	25,00
Sol. 4	0	0	0		1	10,00
Suma					10	100
Sol. 1 > Sol. 2 = Sol. 3 > Sol. 4						

Fuente: Elaboración propia.**Tabla 64.**

Evaluación del criterio “Norma ISO”

Norma ISO	Sol. 1	Sol. 2	Sol. 3	Sol. 4	$\Sigma + 1$	Pond. (%)
Sol. 1		1	1	1	4	40,00
Sol. 2	0		0,5	0	1,5	15,00
Sol. 3	0	0,5		0	1,5	15,00
Sol. 4	0	1	1		3	30,00
Suma					10	100
Sol. 1 > Sol. 4 > Sol. 2 = Sol. 3						

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 65.

Evaluación del criterio “Demanda”

Demanda	Sol. 1	Sol. 2	Sol. 3	Sol. 4	$\Sigma + 1$	Pond. (%)
Sol. 1		1	1	0	3	30,00
Sol. 2	0		0,5	0	1,5	15,00
Sol. 3	0	0,5		0	1,5	15,00
Sol. 4	1	1	1		4	40,00
Suma					10	100
Sol. 4 > Sol. 1 > Sol. 2 = Sol. 3						

Fuente: Elaboración propia.**Tabla 66.**

Evaluación del criterio “Número de acciones”

Número de acciones	Sol. 1	Sol. 2	Sol. 3	Sol. 4	$\Sigma + 1$	Pond. (%)
Sol. 1		1	1	1	4	40,00
Sol. 2	0		1	1	3	30,00
Sol. 3	0	0		0,5	1,5	15,00
Sol. 4	0	0	0,5		1,5	15,00
Suma					10	100
Sol. 1 > Sol. 2 > Sol. 3 = Sol. 4						

Fuente: Elaboración propia.**Tabla 67.**

Evaluación del criterio “Área”

Área	Sol. 1	Sol. 2	Sol. 3	Sol. 4	$\Sigma + 1$	Pond. (%)
Sol. 1		1	1	1	4	40,00
Sol. 2	0		0,5	0	1,5	15,00
Sol. 3	0	0,5		1	2,5	25,00
Sol. 4	0	1	0		2	20,00
Suma					10	100
Sol. 1 > Sol. 3 > Sol. 4 > Sol. 2						

Fuente: Elaboración propia.

En la tabla 68 se aprecia las conclusiones del módulo 3, donde, su solución óptima es la solución 1

Tabla 68.

Evaluación global y priorización de alternativas (Módulo 2)

	Costo	Presión	T.R.	Caudal	N.A.	Filtración	Norma ISO	Demanda	Número de acciones	Área	Pond.	Prioridad
Sol. 1	5,45	6,55	4,36	3,82	4,36	3,64	2,91	1,64	1,45	0,73	34,90	1
Sol. 2	1,82	4,09	4,36	1,36	1,09	2,27	0,27	0,82	1,09	0,27	17,72	3
Sol. 3	3,64	4,09	1,45	1,64	0,55	2,27	0,27	0,82	0,55	0,45	15,73	4
Sol. 4	7,27	1,64	4,36	0,55	0,55	0,91	0,55	2,18	0,55	0,36	18,90	2
Total										84		

Fuente: Elaboración propia.

4.6.4 Módulo 4: Distribución del agua

El módulo se conforma por 2 funciones que son la selección de bloques a regar y la aplicación del agua.

4.6.4.1 Análisis de funciones módulo 4

Selección de bloques a regar

■ Electroválvulas

Dispositivo electromecánico que controla el paso de fluidos mediante una bobina eléctrica, permitiendo la apertura o cierre automático de conductos, esta misma se programará con una tabla de decisión, como se muestra en la figura 34 y sus ventajas y desventajas en la tabla 69.



Figura 34.
Electroválvula

Tabla 69.

Ventajas y desventajas de las electroválvulas

Ventajas	Desventajas
Mejor control del flujo de agua.	Pueden fallar ante variaciones de voltaje.
Facilitan la programación y sectorización del riego.	Son sensibles a partículas y suciedad en el fluido.
Mejoran la eficiencia en el uso del agua.	Presentan mayor inversión.

Fuente: Elaboración propia.

■ Válvulas manuales

Dispositivos mecánicos que regulan el flujo de agua mediante accionamiento directo del operador presentan simplicidad y bajo costo, como se ve en la figura 35y en sus ventajas y desventajas en la tabla 70.



Figura 35.
Válvula manual

Tabla 70.

Ventajas y desventajas de las válvulas manuales

Ventajas	Desventajas
No requieren energía eléctrica.	Necesitan intervención constante del operador.
Bajo costo de adquisición y mantenimiento.	No permiten automatización.
Fácil instalación y operación.	Menor precisión en el control.

Fuente: Elaboración propia.

■ Activación mediante sensores de humedad

El sistema se activará mediante sensores de humedad automáticamente, además, permiten monitorear variables como humedad del suelo, presión y caudal, facilitando el control automático del riego según las condiciones reales del cultivo, como se ve en la figura 36 y sus ventajas y desventajas en la tabla 71.



Figura 36.
Sensores de humedad

Tabla 71.

Ventajas y desventajas del uso de sensores en sistemas de riego

Ventajas	Desventajas
Permiten un control preciso del riego.	Requieren inversión mayor.
Optimizan el uso del agua y reducen desperdicios.	Necesitan mantenimiento periódico.
Facilitan la automatización del sistema.	Dependencia de energía eléctrica.
Mejoran la uniformidad y eficiencia del cultivo.	Pueden verse afectados por fallas electrónicas o ambientales.

Fuente: Elaboración propia.

Aplicación de agua al cultivo

■ Goteo superficial (Drip tape)

La cinta de riego por goteo es un emisor flexible que distribuye el agua de forma localizada y uniforme a lo largo de las hileras del cultivo [34], como se ve en la figura 37 y sus ventajas y desventajas en la tabla 72.



Figura 37.
Goteros drip tape

Tabla 72.

Ventajas y desventajas del drip tape

Ventajas	Desventajas
Bajo costo de adquisición e instalación.	Menor durabilidad.
Distribución uniforme del agua.	Susceptible a daños y perforaciones.
Adecuado para el cultivo de rosas.	Requiere reposición periódica.

Fuente: Elaboración propia.

■ Gotosos autocompensantes

Mantienen un caudal constante ante variaciones de presión, asegurando una aplicación uniforme del agua en los sistemas de riego por goteo[56], como se ve en la figura 38, así como sus ventajas y desventajas en la tabla 73.



Figura 38.
Gotosos autocompensantes

Tabla 73.

Ventajas y desventajas de los goteros autocompensantes

Ventajas	Desventajas
Mantienen caudal uniforme ante variaciones de presión.	Mayor costo.
Mejoran la uniformidad del riego en terrenos con pendiente.	Requieren filtración adecuada.
Aumentan la eficiencia hídrica del sistema.	Instalación más técnica que otros emisores.

Fuente: Elaboración propia.

4.6.4.2 Alternativas de solución módulo 4

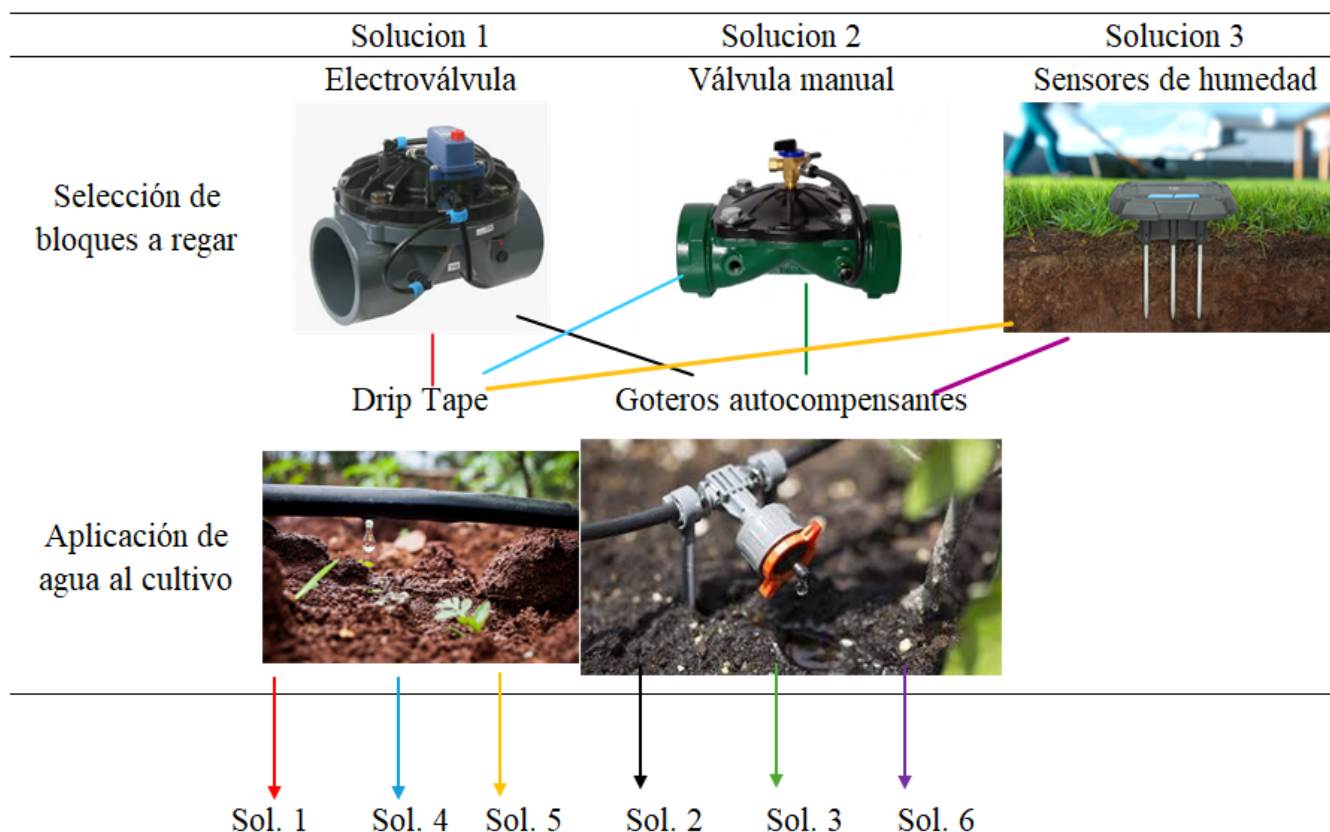


Figura 39.
Alternativas de solución módulo 4

4.6.4.3 Evaluación y Selección de Alternativas Módulo 4

- **Costo:** el costo total de equipos, materiales y componentes debe ser económicamente viable.
- **Tiempo de riego:** el tiempo de operación debe cubrir las necesidades hídricas del cultivo.
- **Caudal:** el caudal suministrado debe satisfacer la demanda de agua del sistema.
- **Nivel de automatización:** se requiere un nivel de automatización acorde a las necesidades del sistema.
- **Seguridad:** se deben mantener condiciones seguras durante la operación y el mantenimiento, minimizando riesgos.

- **Demanda:** debe existir disponibilidad de materiales y repuestos en el mercado local para su mantenimiento.
- **Número de acciones:** la operación debe ser simple, reduciendo la cantidad de acciones requeridas por el usuario.

La tabla 74, presenta la evaluación y valoración de los criterios del módulo 4

Tabla 74.

Valoración de criterios módulo 4

	Costo	Tiempo de riego	Caudal	N.A.	Norma ISO	Control del agua	Demanda	Nro. de acciones	Disolución	$\Sigma + 1$	Pond.
Costo		1	1	1	1	1	1	1	1	9	20 %
T.R.	0		1	1	1	1	1	1	1	8	18 %
Caudal	0	0		1	1	1	1	1	1	7	16 %
N.A.	0	0	0		1	1	1	1	1	6	13 %
Norma ISO	0	0	0	0		1	1	1	1	5	11 %
C.A.	0	0	0	0	0		1	1	1	4	9 %
Demanda	0	0	0	0	0	0		1	1	3	7 %
N. de acciones	0	0	0	0	0	0	0		1	2	4 %
Disolución	0	0	0	0	0	0	0	0		1	2 %
Total									45	100 %	

Fuente: Elaboración propia.

Las Tablas 74, 75, 76, 77, 78, 79, 80, 81 y 82 indican las alternativas de solución para los criterios más relevantes de este módulo: costo, tiempo de riego, caudal, nivel de automatización, norma ISO, control del agua, demanda, número de acciones y disolución.

Tabla 75.

Evaluación del criterio “Costo”

Costo	Sol. 1	Sol. 2	Sol. 3	Sol. 4	Sol. 5	Sol. 6	$\Sigma + 1$	Pond. (%)
Sol. 1		1	0	0	1	1	4	19,05
Sol. 2	0		0	0	1	1	3	14,29
Sol. 3	1	1		0	1	1	5	23,81
Sol. 4	1	1	1		1	1	6	28,57
Sol. 5	0	0	0	0		1	2	9,52
Sol. 6	0	0	0	0	0		1	4,76
Sol. 4 > Sol. 3 > Sol. 1 > Sol. 2 > Sol. 5 > Sol. 6								

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 76.

Evaluación del criterio “Tiempo de riego”

Tiempo de riego	Sol. 1	Sol. 2	Sol. 3	Sol. 4	Sol. 5	Sol. 6	$\Sigma + 1$	Pond. (%)
Sol. 1		0,5	1	1	0,5	0,5	4,5	21,43
Sol. 2	0,5		1	1	0,5	0,5	4,5	21,43
Sol. 3	0	0		0,5	0	0	1,5	7,14
Sol. 4	0	0	0,5		0	0	1,5	7,14
Sol. 5	0,5	0,5	1	1		0,5	4,5	21,43
Sol. 6	0,5	0,5	1	1	0,5		4,5	21,43
Sol. 1 = Sol. 2 = Sol. 5 = Sol. 6 > Sol. 3 = Sol. 4								

Fuente: Elaboración propia.**Tabla 77.**

Evaluación del criterio “Caudal”

Caudal	Sol. 1	Sol. 2	Sol. 3	Sol. 4	Sol. 5	Sol. 6	$\Sigma + 1$	Pond. (%)
Sol. 1		0	0	0,5	0,5	0	2	9,52
Sol. 2	1		0,5	1	1	0,5	5	23,81
Sol. 3	1	0,5		1	1	0,5	5	23,81
Sol. 4	0,5	0	0		0,5	0	2	9,52
Sol. 5	0,5	0	0	0,5		0	2	9,52
Sol. 6	1	0,5	0,5	1	1		5	23,81
Sol. 2 = Sol. 3 = Sol. 6 > Sol. 1 = Sol. 4 = Sol. 5								

Fuente: Elaboración propia.**Tabla 78.**

Evaluación del criterio “Nivel de automatización”

Nivel de automatización	Sol. 1	Sol. 2	Sol. 3	Sol. 4	Sol. 5	Sol. 6	$\Sigma + 1$	Pond. (%)
Sol. 1		0,5	1	1	0	0	3,5	16,67
Sol. 2	0,5		1	1	0	0	3,5	16,67
Sol. 3	0	0		0,5	0	0	1,5	7,14
Sol. 4	0	0	0,5		0	0	1,5	7,14
Sol. 5	1	1	1	1		0,5	5,5	26,19
Sol. 6	1	1	1	1	0,5		5,5	26,19
Sol. 5 = Sol. 6 > Sol. 1 = Sol. 2 > Sol. 3 = Sol. 4								

Fuente: Elaboración propia.**Tabla 79.**

Evaluación del criterio “Cumplimiento de la norma ISO 13849-1”

Norma ISO	Sol. 1	Sol. 2	Sol. 3	Sol. 4	Sol. 5	Sol. 6	$\Sigma + 1$	Pond. (%)
Sol. 1		0,5	1	1	0,5	0,5	4,5	21,43
Sol. 2	0,5		1	0,5	0	0	3	14,29
Sol. 3	0	0		0,5	0	0	1,5	7,14
Sol. 4	0	0,5	0,5		0	0	2	9,52
Sol. 5	0,5	1	1	1		0,5	5	23,81
Sol. 6	0,5	1	1	1	0,5		5	23,81
Sol. 5 = Sol. 6 > Sol. 1 > Sol. 2 > Sol. 4 > Sol. 3								

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 80.

Evaluación del criterio “Control del agua”

Control del agua	Sol. 1	Sol. 2	Sol. 3	Sol. 4	Sol. 5	Sol. 6	$\Sigma + 1$	Pond. (%)
Sol. 1		0	1	1	0,5	0	3,5	16,67
Sol. 2	1		1	1	1	0,5	5,5	26,19
Sol. 3	0	0		1	0	0	2	9,52
Sol. 4	0	0	0		0	0	1	4,76
Sol. 5	0,5	0	1	1		0	3,5	16,67
Sol. 6	1	0,5	1	1	1		5,5	26,19
Sol. 2 = Sol. 6 > Sol. 1 = Sol. 5 > Sol. 3 > Sol. 4								

Fuente: Elaboración propia.**Tabla 81.**

Evaluación del criterio “Demanda”

Demanda	Sol. 1	Sol. 2	Sol. 3	Sol. 4	Sol. 5	Sol. 6	$\Sigma + 1$	Pond. (%)
Sol. 1		1	0	0	1	1	4	19,05
Sol. 2	0		0	0	1	1	3	14,29
Sol. 3	1	1		0	1	1	5	23,81
Sol. 4	1	1	1		1	1	6	28,57
Sol. 5	0	0	0	0		1	2	9,52
Sol. 6	0	0	0	0	0		1	4,76
Sol. 4 > Sol. 3 > Sol. 1 > Sol. 2 > Sol. 5 > Sol. 6								

Fuente: Elaboración propia.**Tabla 82.**

Evaluación del criterio “Número de operaciones”

Nro. de operaciones	Sol. 1	Sol. 2	Sol. 3	Sol. 4	Sol. 5	Sol. 6	$\Sigma + 1$	Pond. (%)
Sol. 1		0,5	1	1	0,5	0,5	4,5	21,43
Sol. 2	0,5		1	1	0,5	0,5	4,5	21,43
Sol. 3	0	0		0,5	0	0	1,5	7,14
Sol. 4	0	0	0,5		0	0	1,5	7,14
Sol. 5	0,5	0,5	1	1		0,5	4,5	21,43
Sol. 6	0,5	0,5	1	1	0,5		4,5	21,43
Sol. 1 = Sol. 2 = Sol. 5 = Sol. 6 > Sol. 3 = Sol. 4								

Fuente: Elaboración propia.**Tabla 83.**

Evaluación del criterio “Disolución”

Disolución	Sol. 1	Sol. 2	Sol. 3	Sol. 4	Sol. 5	Sol. 6	$\Sigma + 1$	Pond. (%)
Sol. 1		0	0	0,5	0,5	0	2	9,52
Sol. 2	1		0,5	1	1	0,5	5	23,81
Sol. 3	1	0,5		1	1	0,5	5	23,81
Sol. 4	0,5	0	0		0,5	0	2	9,52
Sol. 5	0,5	0	0	1		0	2,5	11,90
Sol. 6	1	0,5	0,5	0,5	1		4,5	21,43
Sol. 2 = Sol. 3 > Sol. 6 > Sol. 5 > Sol. 1 = Sol. 4								

Fuente: Elaboración propia.

En la tabla 84, se muestran las conclusiones finales del módulo 4, donde la solución óptima es primera.

Tabla 84.

Ponderación final y prioridad de las alternativas

Alt.	C	TR	Q	NA	ISO	CA	D	NO	DIS	Total	Prio.
Sol. 1	3,81	3,81	1,48	2,22	2,38	1,48	1,27	0,95	0,48	17,88	1
Sol. 2	2,86	1,90	1,59	0,74	0,32	2,33	0,95	0,95	0,48	12,12	2
Sol. 3	4,76	0,64	1,59	0,32	0,16	0,85	1,59	0,32	0,16	10,37	3
Sol. 4	5,71	0,64	0,63	0,32	0,21	0,42	0,90	0,32	0,16	9,32	6
Sol. 5	1,90	1,90	0,63	1,16	0,53	1,48	0,63	0,95	0,48	9,68	5
Sol. 6	0,95	1,90	1,59	1,16	0,53	2,33	0,32	0,95	0,48	10,21	4

Fuente: Elaboración propia.

En la figura 40 se muestra la alternativa general de acuerdo a la mejor solución para cada módulo.

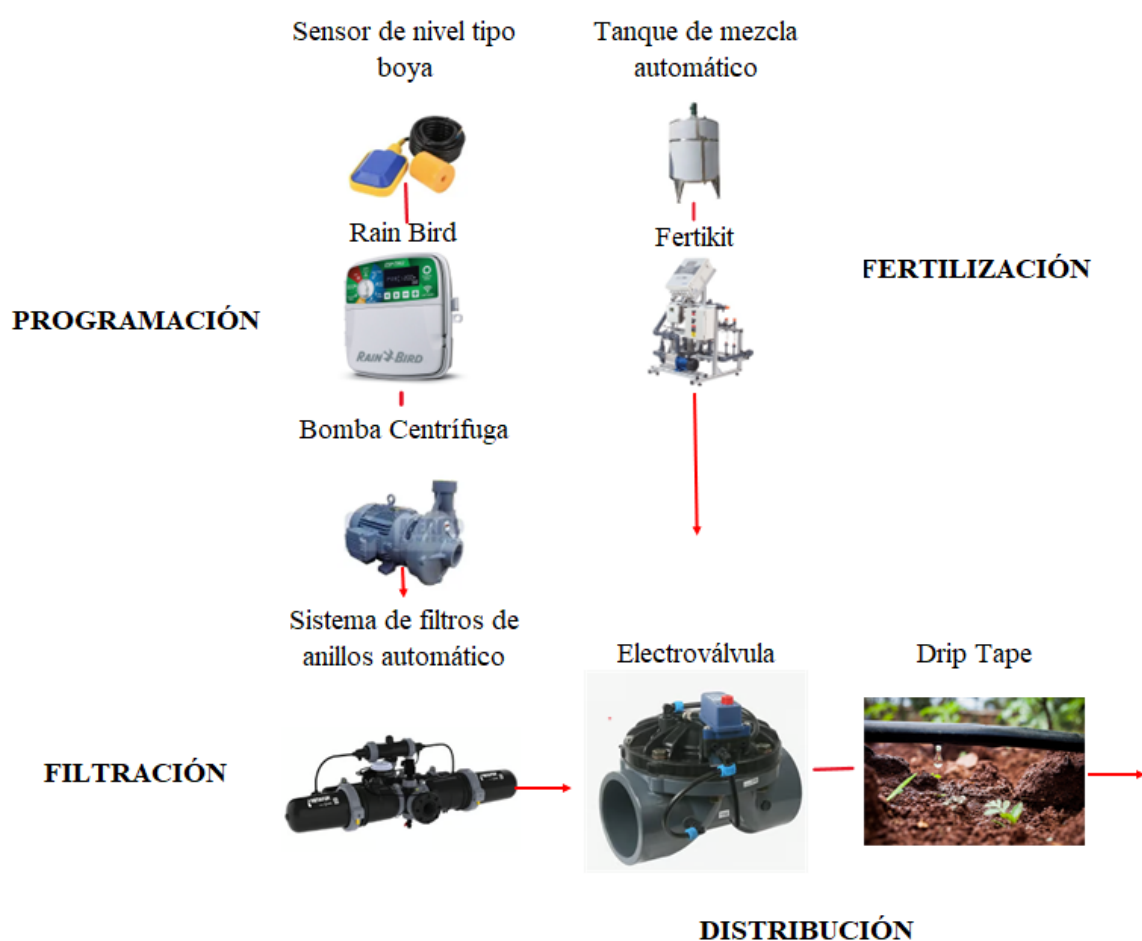


Figura 40.

Solución general por módulos

4.6.5 Propuesta de diseño del sistema de riego

4.6.5.1 Diseño mecánico del sistema

Con la metodología aplicada, casa de la calidad, se consideran los requisitos del cliente, tomando en cuenta la voz del ingeniero para obtener las especificaciones técnicas; este dato permite analizar las funciones que realiza el sistema y seleccionar la alternativa de solución adecuada para este proyecto, además, se considera la forma de fabricación y la disponibilidad del mercado, es así que se llega a obtener el diseño CAD preliminar con sus respectivos planos mecánicos (Ver anexo 3). También, se realizaron cálculos matemáticos que al converger con las simulaciones se ratifica que las soluciones seleccionadas en el diseño del sistema mostrado en la figura 41 cumplirán con la función de abastecer de agua los bloques más alejados del sistema.

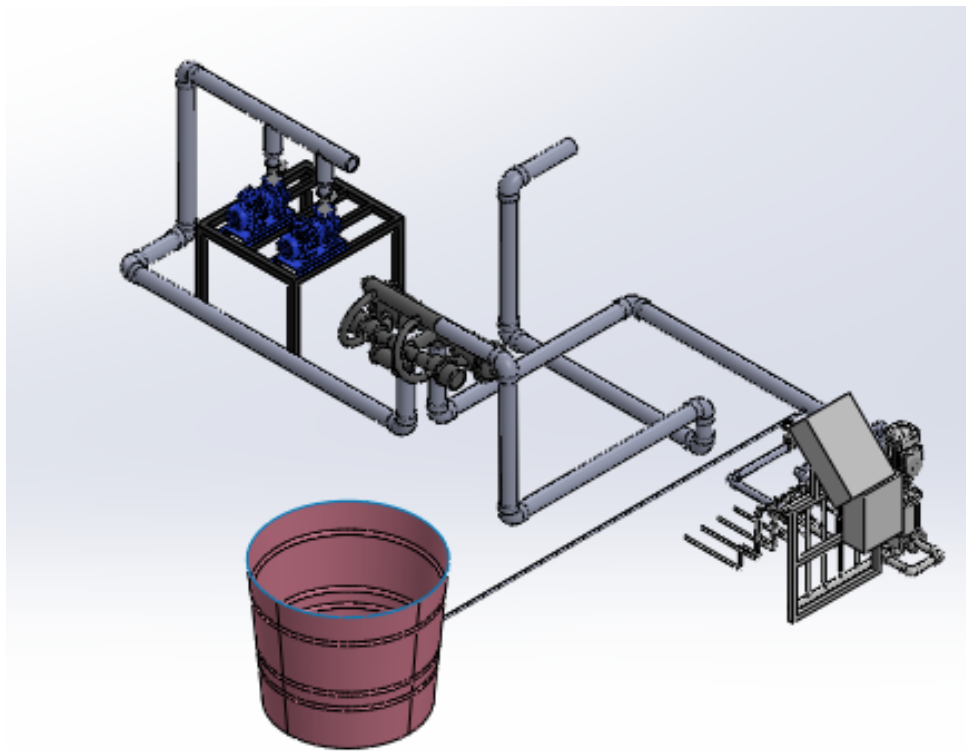


Figura 41.

Diseño CAD de la propuesta de sistema de riego

4.6.5.2 Diseño del sistema eléctrico y de control

Posteriormente al diseño mecánico del sistema, se procedió al diseño del sistema de control y en base a los requisitos de funcionamiento se plantearon en tablas de la verdad (Ver anexo 4) que al resolverlas derivaron en un circuito que se simuló en CadeSIMU para comprobar su funcionamiento lógico (Ver anexo 5), permitiendo definir las condiciones de operación del sistema. Finalmente, la lógica fue implementada en lenguaje Ladder en TIA Portal y simulada mediante PLCSIM, integrando además una interfaz HMI para verificar la interacción y respuesta del sistema automatizado (Ver anexo 6).

4.7 Análisis CFD.

Según [58] las pérdidas de carga localizadas generadas por accesorios pueden representar una parte significativa de la pérdida de carga en un sistema hidráulico y condicionar su desempeño. Anteriormente se evidenció que la carga requerida del sistema de riego era superior a la suministrada por el sistema de bombeo. A partir de ello, el análisis mediante Dinámica de Fluidos Computacional (CFD) se enfocó en los puntos en los que el sistema puede tener cambios bruscos como puede ser en tramos donde pueden existir cambios bruscos, como se ve en la figura 42, con el fin de definir la ubicación más adecuada de la propuesta y evaluar su impacto en el sistema.

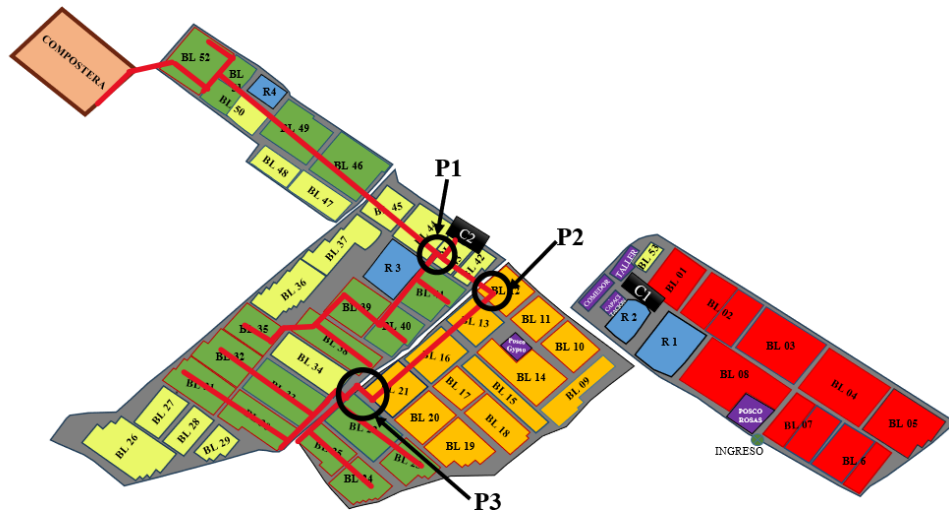


Figura 42.
Puntos críticos para análisis CFD

4.7.1 Análisis en el punto (P1)

La Figura 43 presenta la distribución de velocidades correspondiente al punto 1, el cual se caracteriza por una bifurcación en el conducto. En esta ubicación se observan velocidades que oscilan aproximadamente entre 0,35 m/s y 3,18 m/s, evidenciando una alta variabilidad en el comportamiento del flujo.

En la zona de intersección, el flujo se distribuye de manera desigual entre los ramales, generando aceleraciones en uno de ellos y reducciones significativas de velocidad en el otro. Este fenómeno sugiere la presencia de pérdidas de carga locales asociadas a los cambios de dirección y sección. Sin embargo, a pesar de dichas pérdidas, el sistema logra redistribuir el caudal, manteniendo el envío de agua hacia los diferentes ramales.

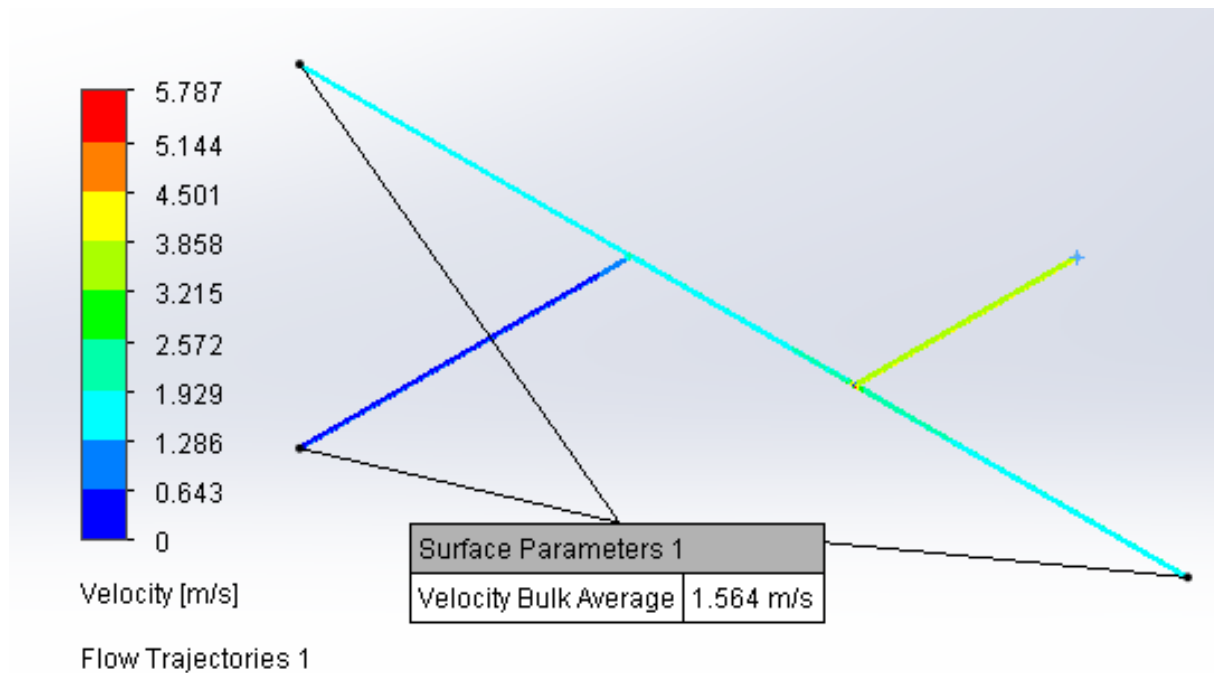


Figura 43.

Distribución de velocidades del flujo en el punto 1 del sistema de riego.

4.7.2 Análisis en el punto (P2)

La Figura 44 muestra la distribución de velocidades del fluido correspondiente al punto 2 del sistema de riego. Los resultados evidencian una velocidad media de 2,174 m/s.

Este comportamiento indica una concentración del flujo cerca de las paredes, lo que puede generar zonas de menor eficiencia hidráulica en el centro del conducto. No obstante, a pesar de la falta de uniformidad, el flujo mantiene una capacidad aceptable para el transporte del caudal, sin presentar pérdidas significativas que comprometan el envío del agua hacia los tramos posteriores del sistema.

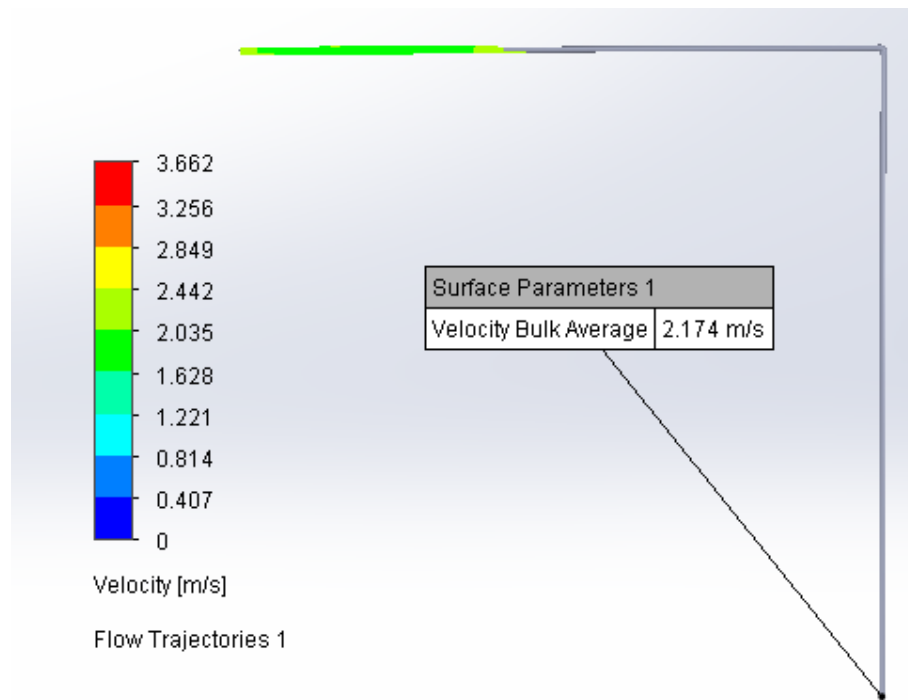


Figura 44.

Distribución de velocidades del flujo en el punto 2 del sistema de riego.

4.7.3 Análisis en el punto (P3)

La Figura 45 muestra la distribución de velocidades del fluido en el punto 3 del sistema de riego. Los resultados indican la presencia predominante de velocidades bajas a lo largo del conducto, principalmente en el rango inferior de la escala, lo que evidencia una disminución progresiva de la energía del flujo.

Si bien se identifica una aceleración puntual en la zona de cambio de dirección del conducto, esta no es suficiente para recuperar la energía del flujo aguas abajo. Como consecuencia, el fluido se desplaza con menor capacidad de arrastre, dificultando el transporte eficiente del caudal hacia los tramos finales del sistema.

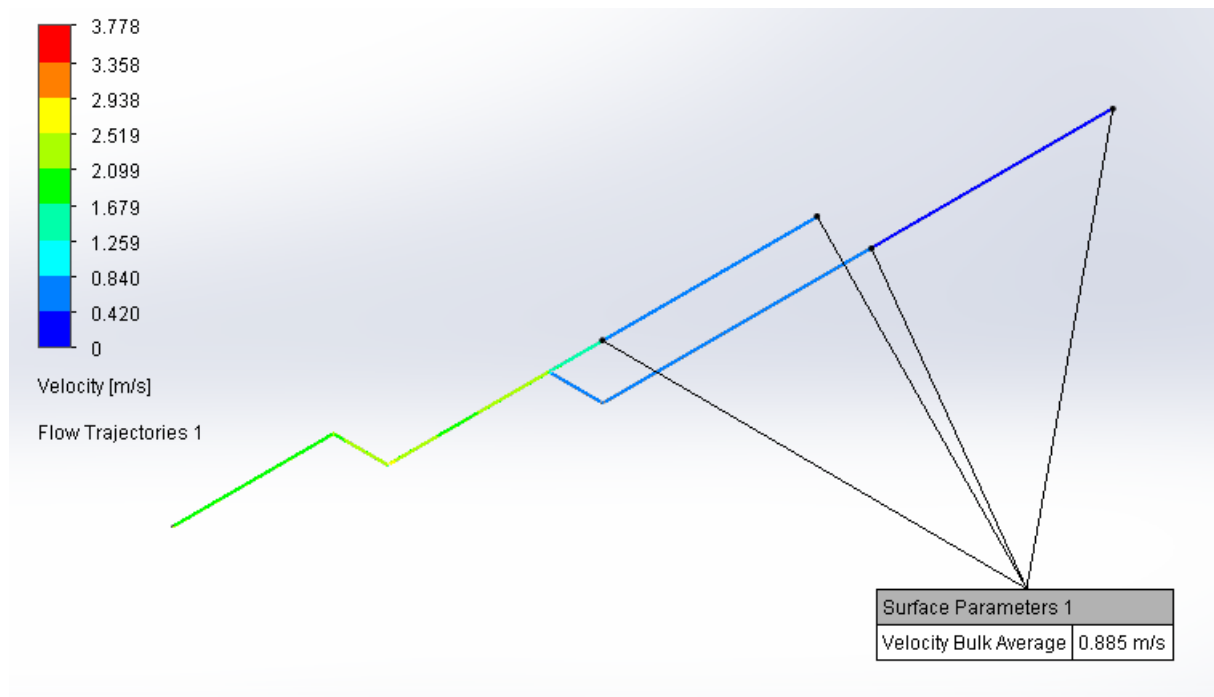


Figura 45.

Distribución de velocidades del flujo en el punto 3 del sistema de riego.

4.7.4 Determinación del punto crítico del sistema

Con el objetivo de identificar la ubicación que presenta mayor dificultad para el envío eficiente del agua dentro del sistema de riego, se realizó una comparación mediante un análisis CFD de los tres puntos, considerando criterios relacionados con la distribución de velocidades, la pérdida de energía del flujo y la capacidad de transporte del caudal. La Tabla 85 resume los principales resultados obtenidos.

El punto 3 fue seleccionado como la ubicación prioritaria de intervención debido a la concurrencia de varias condiciones desfavorables. Adicionalmente, los resultados de la simulación CFD evidencian una predominancia de bajas velocidades y una pérdida progresiva de energía del flujo, lo que refuerza su identificación como el punto más crítico del sistema.

Tabla 85.

Resumen de los resultados CFD en los puntos analizados

Parámetro	Punto 1	Punto 2	Punto 3
Velocidad media volumétrica (m/s)	1.564	2.174	0.885
Zonas de baja velocidad	Marcadas	Localizadas	Extensas
Capacidad de transporte	Media	Media	Baja

Fuente: Elaboración propia.

4.7.5 Validación del modelo de simulación

Los valores reales empleados para la validación del modelo de simulación fueron obtenidos mediante ensayos experimentales realizados sobre el sistema actual. El procedimiento seguido para la toma de datos, así como las condiciones de operación y los instrumentos de medición utilizados, se detallan en el Anexo 7, correspondiente al protocolo de ensayo aplicado.

Para evaluar la confiabilidad del modelo de simulación, se realizó una comparación entre los valores obtenidos mediante simulación y los datos experimentales medidos en el sistema real. La confiabilidad se determinó a partir del cálculo del error porcentual relativo, el cual permite cuantificar la diferencia entre ambos resultados.

El error porcentual relativo se calculó utilizando la siguiente expresión:

$$\text{Error (\%)} = \left| \frac{X_{\text{simulado}} - X_{\text{real}}}{X_{\text{real}}} \right| \times 100$$

donde:

- X_{simulado} corresponde al valor obtenido mediante el modelo de simulación.
- X_{real} corresponde al valor medido experimentalmente en el sistema real.

Según [59], para que los resultados de una simulación sean considerados válidos, la diferencia entre los valores simulados y los datos experimentales del sistema real no debe superar ciertos rangos de error aceptables. En la tabla 86 se presentan los rangos de error porcentual aceptados para la validación de simulaciones en estudios.

Tabla 86.

Rangos de aceptación para la validación de simulaciones

Error porcentual (%)	Nivel de aceptación
≤ 5	Muy aceptable
$> 5 \text{ y } \leq 10$	Aceptable
$> 10 \text{ y } \leq 15$	Poco aceptable
> 15	No aceptable

Fuente: Adaptado de [59].

Datos:

- Velocidad del punto seleccionado en la simulación: 0,885 m/s
- Caudal real medido al final del tramo: 0,00611 m³/s
- Diámetro de la tubería: 90 mm

Velocidad real (experimental)

$$v_{\text{real}} = \frac{Q}{A} = \frac{0,00611}{0,00636} = 0,961 \text{ m/s}$$

Validación CFD

$$\text{Error (\%)} = \left| \frac{v_{\text{CFD}} - v_{\text{real}}}{v_{\text{real}}} \right| \times 100 = \left| \frac{0,885 - 0,961}{0,961} \right| \times 100 = 7,9 \%$$

$$\text{Confiabilidad (\%)} = 100 - 7,9 = 92,1 \%$$

Los resultados obtenidos mediante las simulaciones presentan una concordancia aceptable con los valores experimentales, evidenciando errores dentro de rangos permisibles para análisis hidráulicos. En consecuencia, el modelo numérico puede considerarse válido y confiable para la evaluación del comportamiento del flujo en el sistema analizado.

4.7.6 Definición del punto de intervención para la propuesta

4.7.6.1 Configuración del sistema propuesto

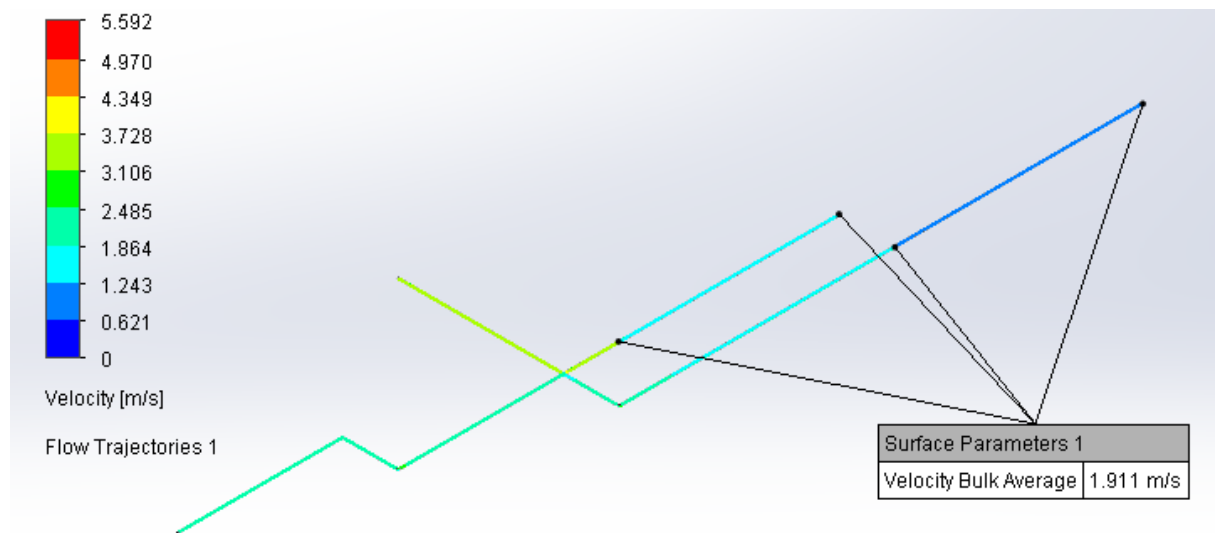


Figura 46.

Comparación de la velocidad final respecto al rango óptimo de operación

4.7.6.2 Variación de condiciones de frontera

Con el fin de evaluar el comportamiento hidráulico del sistema en el punto crítico previamente identificado, se realizaron múltiples simulaciones CFD variando las condiciones de frontera de entrada. En cada simulación se impusieron diferentes valores de caudal volumétrico en las entradas del sistema, manteniendo constantes las condiciones de salida a presión atmosférica. Este enfoque permitió analizar la respuesta del sistema ante distintos escenarios de operación y determinar el rango de funcionamiento hidráulicamente estable.

4.7.6.3 Resultados obtenidos de las simulaciones

A partir de los resultados obtenidos en las simulaciones realizadas, se determinó que la alternativa correspondiente a la simulación S3 presenta el mejor ajuste respecto al valor óptimo de operación del sistema. Como se observa en la tabla 87. Este comportamiento se evidencia también en la figura 47, donde la simulación S3 se posiciona próxima al rango óptimo de funcionamiento, demostrando un equilibrio adecuado entre el caudal total y la velocidad final del sistema.

Tabla 87.

Resultados de simulación del caudal y velocidad del sistema

Simulación	Q_{e1} (m ³ /s)	Q_{e2} (m ³ /s)	Q_T (m ³ /s)	Velocidad final (m/s)	Área (m ²)	Q_s (m ³ /s)
Original	0.0110	0.0000	0.0110	0.8850	0.0064	0.0056
S1	0.0110	0.0060	0.0170	1.2410	0.0064	0.0079
S2	0.0110	0.0060	0.0170	1.3750	0.0064	0.0087
S3	0.0110	0.0100	0.0210	1.9110	0.0064	0.0122
S4	0.0110	0.0110	0.0220	2.3710	0.0064	0.0151
S5	0.0110	0.0120	0.0230	2.4720	0.0064	0.0157
S6	0.0110	0.0150	0.0260	2.6460	0.0064	0.0168

Fuente: Elaboración propia.

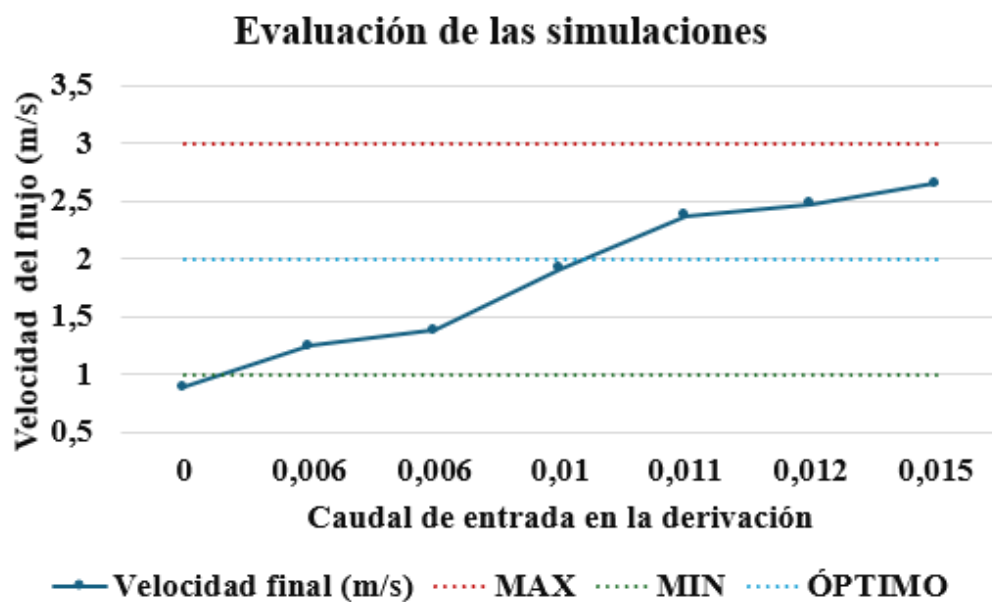


Figura 47.

Comparación de la velocidad final respecto al rango óptimo de operación

La comparación entre el estado original del sistema y la simulación S3 evidencia una mejora significativa en el comportamiento hidráulico. Mientras que el estado original presenta una

velocidad final inferior al valor mínimo recomendado, la simulación S3 alcanza una velocidad cercana al rango óptimo de operación, lo que incrementa la capacidad de transporte del flujo. Esta mejora se relaciona con el diagnóstico hidráulico realizado, el cual identificó un déficit de presión asociado al incremento del caudal simultáneo y a las pérdidas acumuladas del sistema. En este sentido, se valida los cálculos teóricos realizados y demuestra que la propuesta permite mitigar las deficiencias de presión observadas en los bloques más alejados.

4.8 Selección de bomba centrífuga

La selección se realizó a partir del caudal de diseño definido mediante el análisis CFD, el cual permitió identificar un valor óptimo de operación de $0.01 \text{ m}^3/\text{s}$. No obstante, la determinación de la altura manométrica total se efectuó mediante el cálculo hidráulico tradicional, considerando las pérdidas por fricción, pérdidas locales, altura geométrica y la presión mínima requerida para el correcto funcionamiento de los emisores. De este modo, el análisis CFD se empleó como herramienta de validación del caudal seleccionado.

A partir del análisis hidráulico y de las simulaciones CFD realizadas, se establecieron los parámetros de diseño necesarios para la selección de la bomba centrífuga. El caudal para la segunda entrada fue definido con base en la simulación S3, la cual permitió alcanzar un régimen hidráulico adecuado dentro del rango de velocidades recomendado para sistemas de riego presurizado.

Tabla 88.

Parámetros de diseño para la selección de la bomba

Parámetro	Valor
Caudal de la segunda entrada, Q	0.01 m ³ /s (10 L/s)
Altura geométrica, H_g	12 m
Altura dinámica total calculada, H_T	3,16 bar
Presión mínima requerida en goteros	1 bar (10 mca)
Número de bombas existentes	2 (en paralelo)
Tipo de fluido	Agua

Fuente: Elaboración propia.

Con el fin de garantizar un funcionamiento seguro del sistema ante variaciones operativas, pérdidas adicionales no consideradas y desgaste progresivo de los equipos, se adoptó un criterio de selección conservador. Para ello, se aplicó un margen de seguridad del 15 % sobre la altura dinámica total calculada.

$$H_{\text{sel}} = H_T \times 1,15 = 32,2 \times 1,15 \approx 37 \text{ mca} \approx 3,63 \text{ bar} \quad (4.8)$$

De este modo, el punto de operación utilizado para la selección de la bomba centrífuga corresponde a un caudal de 0.01 m³/s y una altura manométrica aproximada de 3,63 bares.

4.8.1 Análisis bombas existentes

A partir de la información obtenida de la placa de características de las bombas actualmente instaladas, se determinó que se trata de equipos diseñados para operar a elevados valores de altura manométrica y caudales relativamente bajos. Cada bomba presenta un rango de caudal entre 0,0016 y 0,067 m³/s.

Al considerar que las bombas se encuentran instaladas en configuración paralela, el cau-

dal total del sistema corresponde a la suma de los caudales individuales, mientras que la altura manométrica se mantiene constante. No obstante, aun bajo esta configuración, el caudal máximo suministrado resulta inferior al requerido por el sistema, lo que explica el déficit de presión observado en los bloques más alejados, la tabla 89 presenta una comparación del sistema original y el sistema propuesto.

Tabla 89.

Comparación del comportamiento hidráulico en el punto crítico

Parámetro	Sistema original	Sistema propuesto
Número de entradas	1	2
Caudal entrada 1 (m ³ /s)	0.011	0.011
Caudal entrada 2 (m ³ /s)	0.000	0.010
Caudal total (m ³ /s)	0.011	0.021
Velocidad en punto crítico (m/s)	0.885	1.911

Fuente: Elaboración propia a partir del análisis CFD.

Una vez definido el punto de operación del sistema propuesto, se establecieron los criterios técnicos necesarios para la selección de la bomba centrífuga. El equipo seleccionado debe ser capaz de suministrar el caudal total requerido a la altura manométrica definida, operando dentro de un rango estable y cercano a su punto de máxima eficiencia, evitando condiciones de operación forzada o ineficiente.

Adicionalmente, se consideró que la bomba debe ser adecuada para aplicaciones de riego presurizado, permitir un funcionamiento continuo y confiable, y garantizar el abastecimiento adecuado de los bloques más alejados del sistema bajo condiciones de operación simultánea.

Con base en el punto de operación definido y los criterios técnicos establecidos con la simulación, se procedió a la revisión de curvas características de bombas centrífugas comerciales. La bomba seleccionada es aquella cuya curva de operación permite cubrir el punto de operación requerido, correspondiente a un caudal de 0.021 m³/s y una altura manométrica aproximada de 37 mca, operando dentro de su rango óptimo de eficiencia.

Tras la revisión de las curvas características de bombas comerciales, se seleccionó la bomba centrífuga horizontal de una etapa modelo Grundfos TP 50-180/2.

Dado el elevado caudal requerido por el sistema, se optó por la instalación de dos bombas idénticas operando en paralelo. Bajo esta configuración, cada bomba suministra aproximadamente la mitad del caudal total requerido. Esta solución garantiza un funcionamiento estable del sistema de riego y permite el abastecimiento adecuado de los bloques más alejados, solucionando el déficit de presión identificado en la configuración original.

Tabla 90.

Selección de la bomba centrífuga propuesta

Parámetro	Valor
Modelo seleccionado	Grundfos TP 50-180/2
Tipo de bomba	Bomba en línea
Número de bombas	2
Configuración	Paralelo
Caudal nominal por bomba	0,005 m ³ /s (18,3 m ³ /h)
Caudal total requerido de la propuesta	0.01 m ³ /s
Altura manométrica nominal	33-35 mca
Altura manométrica requerida	37 mca

Fuente: Elaboración propia a partir de datos del fabricante.

4.9 Análisis de costos

Tabla 91.

Costos de equipos del sistema propuesto

Descripción	Cantidad	Costo unitario (USD)	Costo total (USD)
Grundfos TP 50-180/2	2	4 580	9 160
Tanque de alimentación	1	1 800	1 800
Sistema de filtros de anillos	1	1 200	1 200
Programador de riego Rain Bird	1	450	450
Sistema de fertilización (Fertikit)	1	2 500	2 500
Tanque de mezcla automático	1	1 000	1 000
Sensor de nivel tipo boya	1	120	120
Subtotal			16 230

Fuente: Elaboración propia.

4.9.1 Retorno de la inversión

4.9.2 Datos de partida

Para el análisis económico se consideran los siguientes parámetros reales del sistema:

- **Inversión total requerida:** \$16,230
- **Producción semanal normal:** 70,000 tallos
- **Precio promedio por tallo:** \$0.25
- **Semanas productivas al año:** 40 semanas

4.9.3 Cálculo de ingresos anuales actuales

La producción anual se calcula considerando la operación normal del sistema:

$$\text{Producción anual} = 70,000 \text{ tallos/semana} \times 40 \text{ semanas} = 2,800,000 \text{ tallos}$$

$$\text{Ingreso anual actual} = 2,800,000 \times 0,25 = \$700,000$$

El diagnóstico hidráulico mostró un déficit de presión de 15.8 mca respecto a los 32.2 mca requeridos. Esta condición genera un valor conservador de:

$$\text{Pérdida anual estimada} = 700,000 \times 0,18 = \$126,000$$

Donde el 18 % representa la reducción en producción y calidad debido al riego no uniforme.

4.9.4 Beneficios de la implementación

4.9.4.1 Recuperación de producción

El sistema de bombeo en paralelo recupera aproximadamente el 65 % de las pérdidas:

$$B_{\text{producción}} = 126,000 \times 0,65 = \$81,900$$

4.9.4.2 Ahorros operativos

- **Mano de obra:** \$1,800/año
- **Agua y fertilizantes:** \$2,200/año
- **Mantenimiento:** \$1,000/año
- **Total ahorros:** \$5,000

4.9.4.3 Beneficio bruto anual

$$B_{\text{bruto}} = 81,900 + 5,000 = \$86,900$$

4.9.5 Costos operativos incrementales

- **Energía eléctrica:** \$2,500/año
- **Mantenimiento preventivo:** \$800/año
- **Total costos:** \$3,300

4.9.6 Beneficio neto anual

$$B_{\text{neto}} = 86,900 - 3,300 = \$83,600$$

4.9.7 Indicadores de rentabilidad

4.9.7.1 Retorno de la Inversión (ROI)

$$\text{ROI} = \left(\frac{B_{\text{neto}}}{I} \right) \times 100 = \left(\frac{83,600}{16,230} \right) \times 100 = 515 \%$$

4.9.7.2 Periodo de Recuperación

$$\text{Payback} = \frac{I}{B_{\text{neto}}} = \frac{16,230}{83,600} = 0,194 \text{ años}$$

$$\text{Payback en días} = 0,194 \times 365 = 71 \text{ días}$$

4.9.8 Resumen de resultados

Indicador	Valor	Unidad
Inversión total	16,230	USD
Beneficio neto anual	83,600	USD/año
Retorno de Inversión (ROI)	515	%
Periodo de Recuperación	71	días

Tabla 92.

Indicadores de rentabilidad del proyecto

CONCLUSIONES

El análisis técnico del sistema de riego permitió evidenciar un déficit de presión en los bloques más alejados, originado por el crecimiento progresivo de la red, el aumento del caudal simultáneo de operación y la acumulación de pérdidas hidráulicas. La diferencia entre la Altura Dinámica Total requerida y la presión disponible en condiciones reales explica el comportamiento ineficiente observado en ciertos sectores del sistema. Bajo este contexto, la propuesta de un sistema de rebombeo en serie, apoyada en cálculos hidráulicos, simulaciones y criterios de automatización, se plantea como una alternativa técnicamente viable para mejorar la distribución de presión en la red.

La recopilación de información técnica permitió establecer rangos de referencia para caudal, presión, velocidad y eficiencia operativa. Estos criterios facilitaron la evaluación del comportamiento hidráulico del sistema existente y la validación de los cálculos relacionados con pérdidas de carga y requerimientos de presión. Además, las mediciones realizadas en campo permitieron establecer que la presión a la salida de la bomba es de aproximadamente 2.5 bar, mientras que en la entrada del bloque más lejano se registra una presión de 0,65 bar, lo que genera una caída real de presión de 1,85 bar. La comparación entre los valores calculados y los medidos evidenció un déficit de presión significativo, confirmando que el sistema opera por debajo de los requerimientos mínimos para el correcto funcionamiento de los emisores.

El análisis hidráulico determinó las condiciones necesarias para un funcionamiento óptimo del cultivo. Considerando la operación simultánea de dos bloques, se estableció un caudal mínimo requerido en el punto de descarga de 28,1 m³/h. Adicionalmente, se calcularon las pérdidas por fricción (1,21 bar), las pérdidas menores por accesorios (0,071 bar), la presión mínima en emisores (0,69 bar) y la altura geodésica (1,19 bar), obteniéndose una Altura Dinámica Total (ADT) requerida de 3,16 bar.

La propuesta de automatización se estructuró a partir de la priorización de requerimientos mediante el análisis QFD y de la definición de módulos funcionales de programación, filtración, fertilización y distribución. Esta estructura permitió evaluar alternativas técnicas en fun-

ción de su desempeño hidráulico esperado y su compatibilidad con el sistema existente.

Las simulaciones CFD realizadas en tres puntos de la red permitieron identificar como crítico el punto más alejado y con mayor concentración de accesorios. A partir de este análisis, se planteó la incorporación de un ramal adicional, determinándose que una configuración con caudales de 0,011 m³/s en la entrada principal y 0,010 m³/s en el ramal propuesto permitiría alcanzar velocidades cercanas a 2 m/s, valor recomendado para sistemas de riego. En este contexto, la selección del equipo de bombeo y el análisis económico sugieren que la propuesta podría resultar técnica y económicamente viable bajo las condiciones evaluadas al permitir compensar las pérdidas de carga y las divisiones del flujo a lo largo de la red.

La propuesta de automatización del sistema de riego se definió mediante la incorporación de herramientas tecnológicas de simulación y control, partiendo del diseño mecánico y continuando con la estructuración lógica del sistema a través de tablas de verdad que permitieron establecer las condiciones de operación. A partir de su resolución, se obtuvo el circuito de control, el cual fue simulado en CadeSIMU para validar su funcionamiento eléctrico y posteriormente implementado en lenguaje Ladder en TIA Portal, siendo verificado mediante PLC-SIM e integrado con una interfaz HMI. Este proceso permitió comprobar el correcto desempeño del sistema automatizado, evidenciando que la propuesta es técnicamente viable.

RECOMENDACIONES

Dado que el análisis y la propuesta se desarrollaron a partir de condiciones hidráulicas medidas en un periodo específico de operación, se recomienda que, en trabajos futuros, se incorporen campañas de medición en distintos escenarios operativos y estacionales. Esto permitiría evaluar la variabilidad del comportamiento del sistema y fortalecer la confiabilidad de los parámetros utilizados en la propuesta de rebombeo y automatización.

La recopilación de información técnica se apoyó en antecedentes teóricos, datos históricos del sistema y mediciones realizadas en campo, lo que permitió contar con una base sólida para el análisis desarrollado. No obstante, se recomienda que, en trabajos posteriores, se documente de manera más sistemática la procedencia, periodicidad y condiciones de obtención de estos datos, con el fin de mejorar la trazabilidad de la información y facilitar su replicabilidad en estudios similares.

El diagnóstico del sistema se apoyó en mediciones puntuales de presión y caudal, así como en diagramas de análisis del proceso. Se recomienda que futuros estudios consideren un mayor número de puntos de medición y repeticiones de las pruebas, con el fin de disminuir el margen de error asociado a las mediciones en campo y mejorar la precisión del diagnóstico hidráulico.

La propuesta de automatización y rebombeo fue evaluada mediante simulaciones hidráulicas y CFD bajo condiciones específicas de operación. Se recomienda que, en una etapa posterior, se realicen pruebas piloto o validaciones experimentales a escala real o reducida, que permitan contrastar los resultados de las simulaciones con el comportamiento real del sistema y ajustar los parámetros de diseño en caso de ser necesario.

Se recomienda que, en futuras etapas del proyecto, se complementen estos resultados con pruebas en condiciones reales de operación, a fin de contrastar el desempeño del sistema frente a variaciones propias del entorno productivo. Asimismo, la incorporación progresiva de sistemas de monitoreo y registro de datos podría contribuir a optimizar los parámetros de control y mejorar la eficiencia del proceso.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] I. N. de Estadística y Normalización (INEN), “NTE INEN-ISO 11228-1: Ergonomía - Manipulación manual de cargas,” 2012.
- [2] C. F. N. (CFN), “Ficha Sectorial Flores. Subgerencia de Análisis de Productos y Servicios,” 2022. dirección: <https://www.cfn.fin.ec/wp-content/uploads/downloads/biblioteca/2022/fichas-sectoriales-3-trimestre/Ficha-Sectorial-Flores.pdf>.
- [3] S. Vásquez-Dávila y D. Bravo-Benavides, “Impacto del cambio climático en la producción agrícola de la provincia de Loja, periodo 2007-2020,” *Revista Económica*, vol. 11, págs. 95-106, 1 ene. de 2023, ISSN: 2737-6257. DOI: 10.54753/rve.v11i1.1623.
- [4] Food y A. O. of the United Nations, “More people, more food, worse water? A global review of water pollution from agriculture,” 2018.
- [5] L. Barragán, “Automatización de Procesos en la Industria 4.0,” 2023. dirección: <https://ojs.formacion.edu.ec/index.php/rei/article/view/v5.n1.a7>.
- [6] M. del Ambiente del Ecuador, *Código Orgánico del Ambiente*, 2018.
- [7] A. Rajee e I. Khan, *AUTOMATIC IRRIGATION SYSTEM*. nov. de 2024. DOI: 10.13140/RG.2.2.17993.56169.
- [8] R. G. M. Romero, G. R. Aguilar y S. J. A. López, “Impact of Automatization of Irrigation: Case Study,” *Computación y Sistemas*, vol. 24, 2 jun. de 2020, ISSN: 2007-9737. DOI: 10.13053/cys-24-2-3412.
- [9] Fundación PRODUCE Chiapas, A.C., “Guía de Cultivo de Rosas,” español, Fundación PRODUCE Chiapas, A.C., Tuxla Gutiérrez, Chiapas, México, inf. téc., 2025, Información extraída y compilada de Infojardin.com y Producechiapas.org. Recuperado de: <https://es.scribd.com/document/685928679/Manual-completo-para-cultivar-rosas>.
- [10] P. Kumar, “A Review on Types of Irrigation System and their Advantages,” vol. 5, 2018.

- [11] Intagri, “Diseño Agronómico del Sistema de Riego por Goteo,” 2019.
- [12] E. J. ORTIZ-SAMPRON, “Influence of the Effective Wet Bulb on the Design of Drip Irrigation Systems,” *Revista Ciencias Tecnológicas Agropecuarias*, vol. 33, jun. de 2024, ISSN: 2071-0054. dirección: http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2071-00542024000300001&nrm=iso.
- [13] P. R. Cross, “Introduction: Benefits of Flexible Water Delivery,” *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, vol. 133, págs. 1-1, 1 feb. de 2007, ISSN: 0733-9437. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9437(2007)133:1(1).
- [14] H. de Culturas, “Riego por gravedad: Qué es, ventajas y desventajas,” 2023. dirección: <https://hablemosdeculturas.com/riego-por-gravedad/>.
- [15] Agropinos, “Sistema de riego por aspersión: ¿Qué es y cómo funciona?,” dirección: <https://www.agropinos.com/blog/sistema-de-riego-por-aspersion>.
- [16] B. Bhattarai, S. Singh, S. V. Angadi, S. Begna, R. Saini y D. Auld, “Spring safflower water use patterns in response to preseason and in-season irrigation applications,” *Agricultural Water Management*, vol. 228, pág. 105 876, feb. de 2020, ISSN: 03783774. DOI: 10.1016/j.agwat.2019.105876.
- [17] M. Groover, *Automation, production systems, and computer-integrated manufacturing Edition: 4th*. Pearson, 2014.
- [18] E. Bwambale, F. K. Abagale y G. K. Anornu, “Smart irrigation monitoring and control strategies for improving water use efficiency in precision agriculture: A review,” *Agricultural Water Management*, vol. 260, pág. 107 324, feb. de 2022, ISSN: 03783774. DOI: 10.1016/j.agwat.2021.107324.
- [19] J. Nesterak, M. Szelaowski y P. Radziszewski, “Workplace performance measurement: digitalization of work observation and analysis,” *Journal of Intelligent Manufacturing*, vol. 36, págs. 3569-3585, 5 jun. de 2025, ISSN: 0956-5515. DOI: 10.1007/s10845-024-02419-x.

- [20] B. Krishna y S. Eilon, "A comparison between work factor and methods time measurement systems in work measurement for short cycles," *Production Engineer*, vol. 39, pág. 377, 6 1960, ISSN: 00329851. DOI: 10.1049/tpe.1960.0042.
- [21] F. Mazareinezhad, F. Sekkay y D. Imbeau, "Development of a framework to implement time analysis in digital human modeling systems using predetermined motion time systems," *Discover Applied Sciences*, vol. 7, pág. 356, 5 abr. de 2025, ISSN: 3004-9261. DOI: 10.1007/s42452-025-06813-9.
- [22] L. W. Mays, S. L. Invarig, C. M. Gómez y R. U. Azpitarte, *Manual de sistemas de distribución de agua*. McGraw-Hill, 2002, ISBN: 9788448136789.
- [23] FAO, *Riego localizado*. FAO, 1985.
- [24] C. M. Burt et al., "Irrigation Performance Measures: Efficiency and Uniformity," *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, vol. 123, n.º 6, págs. 423-442, 1997. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9437(1997)123:6(423).
- [25] J. M. Montgomery, *Water Treatment Principles and Design*, 2.ª ed. John Wiley & Sons, 2005, Conceptualiza la función de eliminación de partículas en el tratamiento del agua.
- [26] T. M. Walski, D. V. Chase, D. A. Savic, J. C. Thomson, J. Gessler y S. Hurley, *Water Distribution Systems Handbook*, 2.ª ed. McGraw-Hill Professional, 2007, Capítulo 3: Pipes and Pipe Fittings.
- [27] J. G. Saldarriaga, *Introducción a la Ingeniería de Sistemas de Distribución de Agua*. Bogotá, Colombia: Universidad de los Andes, 2007, Capítulo sobre Elementos de Red.
- [28] AWWA (American Water Works Association), *M32: Computer Modeling of Water Distribution Systems*, 3.ª ed. American Water Works Association (AWWA), 2010, Conceptualiza las funciones de válvulas y dispositivos de control.
- [29] D. Pitts, "Energy Efficiency in Irrigation Pumping Plants," University of Florida, IFAS Extension, Technical Report, 2000. dirección: <https://edis.ifas.ufl.edu/pdf/AE/AE08600.pdf>.

- [30] United States Department of Agriculture, Natural Resources Conservation Service, *Irrigation Pumping Plant (Code 533)*. *National Engineering Handbook*, USDA NRCS, 2016. dirección: <https://directives.sc.egov.usda.gov/OpenNonWebContent.aspx?content=35182.wba>.
- [31] B. R. Munson, D. F. Young, T. H. Okiishi y W. W. Huebsch, *Fundamentals of Fluid Mechanics*, 7th. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, 2013, ISBN: 9781118116135.
- [32] *AWWA M55: PE Pipe — Design and Installation*, 1st edition, American Water Works Association, Denver, CO, 2006. dirección: <https://fa.parseethylene-kish.com/UserFiles/Uploads/Standards/AWWA-M55-2006-1st-PE-Pipe-Design-and-Installation.pdf>.
- [33] F. Pizarro, *Riegos Localizados de Alta Frecuencia*. Madrid, España: Ediciones Mundi-Prensa, 1990, ISBN: 8471143258.
- [34] Food y A. O. of the United Nations, *Irrigation Water Management: Irrigation System Operation* (Irrigation and Drainage Paper 45), en. Rome, Italy: FAO, 1992. dirección: <https://www.fao.org/4/ai596e/ai596e.pdf>.
- [35] H. M. Morris, *Applied Hydraulics in Engineering*. New York: John Wiley y Sons, 1992.
- [36] J. Keller y R. D. Bliesner, *Sprinkler and Trickle Irrigation*. Springer Science+Business Media, 1990.
- [37] Wilo SE, *Pump Selection Guide: Fundamentals of Pump Technology*, Technical documentation. Consultado: 2025-12-14, Wilo SE, 2019. dirección: <https://cms.media.wilo.com/cdndoc/wilo747157/10315590/wilo747157.pdf>.
- [38] A. P. Savva y K. Frenken, *Irrigation Manual: Planning, Development, Monitoring and Evaluation of Irrigated Agriculture with Farmer Participation*. Rome: Food y Agriculture Organization of the United Nations (FAO), 2002, Consultado: 2025-12-14. dirección: <https://openknowledge.fao.org/server/api/core/bitstreams/8de388c3-69d5-4c6e-b46d-240a5486e93f/content>.

- [39] A. Ajaz et al., *Design and Operations Manual: Pressurized Irrigation Systems (Volume I)*, Manual técnico (PDF), Consultado: 2025-12-14, 2018. dirección: https://www.researchgate.net/profile/Ali-Ajaz-2/publication/326379761_Design_and_Operations_Manual_Pressurized_Irrigation_Systems_Volume_I/links/5b48dadb45851519b4b84e51/Design-and-Operations-Manual-Pressurized-Irrigation-Systems-Volume-I.pdf.
- [40] F. Cafaggi, A. Adriana, E. A. Rodal Canales y A. Sánchez Huerta, *Sistemas de bombeo*, 2.^a ed. Ciudad de México: Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México, 2021, Edición digital basada en la versión impresa. dirección: <http://www.ptolomeo.unam.mx:8080/xmlui/handle/RepoFi/17564>.
- [41] A. M. Varela Muñoz y M. F. S. Monroy González, “Cavitación en los sistemas de bombeo,” *Dialnet*, 2015, Fundamentos del fenómeno de cavitación en sistemas hidráulicos. dirección: <https://dialnet.unirioja.es/descarga/articulo/8793417.pdf>.
- [42] Documento Técnico de Ingeniería Hidráulica, *Velocidad de flujo recomendada en tuberías y tubos*, <https://es.scribd.com/document/917173043/6-4-VELOCIDAD-DE-FLUJO-RECOMENDADA-EN-TUBERIAS-Y-TUBOS>, Guía técnica utilizada para criterios de diseño hidráulico, 2019.
- [43] Universidad de Granada, *Bombas y tuberías: criterios de diseño hidráulico*, <https://www.ugr.es/~aulavirtualpfcicq/descargas/documentos/BOMBAS%20Y%20TUBERIAS.pdf>, Material académico de apoyo para diseño de sistemas hidráulicos, 2018.
- [44] Dassault Systèmes, *Technical Reference: SOLIDWORKS Flow Simulation*, Version 2021, Dassault Systèmes, Vélizy-Villacoublay, France, 2021.
- [45] Falcon Farms. “Falcon Farms. Innovación, calidad y sostenibilidad en la producción florícola.” Consultado: 09-nov-2025. dirección: <https://falconfarmsonline.com/>.
- [46] M. d. I. Á. Monroy Mejía y N. Nava Sánchezllanes, *Metodología de la investigación*, es. México: Grupo Editorial Éxodo, 2018, pág. 169, ISBN: 9786078543397. dirección: <https://elibro.net/es/lc/utnorte/titulos/172512>.

- [47] G. M. E. Baena Paz, *Metodología de la investigación*, es. México: Grupo Editorial Patria, 2017, pág. 157, ISBN: 9786077447481. dirección: <https://elibro.net/es/lc/utnorte/titulos/40513>.
- [48] S. Chacón-Moscoso, M. T. Anguera-Argilaga, S. Sanduvete-Chaves, J. L. Losada-López, J. A. Lozano-Lozano y M. Portell-Vidal, "Methodological quality checklist for studies based on observational methodology (MQCOM)," *Psicothema*, vol. 31, n.º 4, págs. 458-464, 2019, Consultado el 9 de diciembre de 2025, ISSN: 0214-9915. dirección: <https://hdl.handle.net/2445/153943>.
- [49] *ISO 19011:2018 — Guidelines for auditing management systems*, Standard for auditing processes and development of checklists, International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland, 2018. dirección: <https://www.iso.org/standard/70017.html>.
- [50] R. Hernández Sampieri, C. Fernández Collado y P. Baptista Lucio, *Metodología de la investigación*, es, 6.ª ed. México: McGraw-Hill, 2014, ISBN: 978-6071502919.
- [51] C. A. Bernal Torres, *Metodología de la investigación: para administración, economía, humanidades y ciencias sociales*, es, 3.ª ed. Bogotá, Colombia: Pearson Educación, 2010, ISBN: 9789586991071.
- [52] C. Riba Romeva, *Diseño concurrente*. Barcelona: Edicions UPC, 2002, ISBN: 84-8301-598-6.
- [53] SINAIS. "Ventajas y desventajas de un PLC en el control industrial." Accedido en 2025. dirección: <https://sinais.es/ventajas-y-desventajas-de-un-plc-en-el-control-industrial/>.
- [54] I. J. Karassik, J. P. Messina, P. Cooper y C. C. Heald, *Pump Handbook*, 4th. New York: McGraw-Hill, 2008.
- [55] H. M. Morris y D. C. Wiggert, *Applied Hydraulics in Engineering*. New York: John Wiley & Sons, 1972.
- [56] Netafim Ltd., *Fertigation and Nutrition Solutions*, Accessed: 2025-01-24, 2023. dirección: <https://www.netafim.com>.

- [57] AZUD Group, *Fertigation and Dosing Systems*, Accessed: 2025-01-24, 2023. dirección: <https://www.azud.com>.
- [58] R. W. Fox, A. T. McDonald y P. J. Pritchard, *Introduction to Fluid Mechanics*, 8.^a ed. New York: John Wiley & Sons, 2015.
- [59] A. M. Law, *Simulation Modeling and Analysis*, 5.^a ed. New York: McGraw-Hill Education, 2015, ISBN: 978-0073401324.

ANEXOS

Anexo 1: Requisitos del cliente

Resumen

La finca AZAMA se propone una adecuación del filtrado de duchas y goteo para el cabezal CARAJILLO, adicionalmente la creación de un nuevo sector de riego para el producto rosa, teniendo presente las siguientes premisas:

- El sistema hidráulico debe suplir las necesidades de las plantas y no lo contrario.
- Sistema flexible, proyectado para diferentes puntos de inyección.
- Distribución uniforme del agua y los nutrientes a todas las plantas.
- Que el sistema sea capaz de suplir los requerimientos de agua de las plantas en un tiempo determinado.
- La velocidad de flujo en tubería no debe exceder 2 m/s.
- Para eliminar tiempos de llenado durante cada operación, la tubería principal siempre permanecerá llena.
- Utilizar al máximo los elementos hidráulicos que se encuentren funcionales.
- Entre otros.

Descripción del Proyecto

Incluye instalación de sistema de bombeo, una batería de gravas para filtrado para goteo y una batería de anillos para duchas. Se incluye un centro de inyección de fertilizante para el nuevo sector de riego ROSA. La red de distribución de la finca será modificada para garantizar la separación propuesta de los sectores de riego.

1. Cabezal de Riego

Cabezal Goteo

- Caudal nominal: 100 m³/h.
- Fuente de agua: Tanque de almacenamiento.
- Se pretende regar el sector de Gypsophila y los dos sectores de rosa.

Cabezal Duchas

- Caudal nominal: 40 m³/h.
- Fuente de agua: Tanque almacenamiento.
- Se pretende regar el sector de Gypsophila y los dos sectores de rosa.

Sector de riego propagación / Enraizamiento

- Gypsophila: bloques 26–27–28–29–34–36–37–42–43–44–45–47–48–50–53. Número de válvulas: 35. Caudal: 25 m³/h.
- Sector 3: bloques 41–40–39–38–46–49–50–51–52. Número de válvulas: 22. Caudal: 30 m³/h.
- Sector 4: bloques 22–23–24–25–30–31–32–32–33–35. Número de válvulas: 22. Caudal: 30 m³/h.
- Duchas: bloques del 26 al 52, 12 regadores al tiempo, caudal 40 m³/h.

Unidad de Bombeo

Para la red de duchas se instalarán bombas conectadas en paralelo con todos sus accesorios de succión y descarga, sus motores anclados a un variador de frecuencia y con la capacidad

de suplir las necesidades del sistema de riego (caudal nominal – presión de trabajo). Estarán ubicadas en la caseta del Carajillo.

Para la red de goteo se solicita validar la capacidad instalada; se cuenta con las siguientes bombas:

Cabezal CARAJILLO: 4 unidades, marca Grundfos DG10, potencia 10 hp.

Batería de Filtrado

Se instalará una batería con filtros de anillos para la red de duchas con la capacidad de retrolavado automático por diferencial de presión y tiempo, asegurando 120 mesh. Estará ubicada en la caseta el Carajillo.

Actualmente el cabezal de riego cuenta con ocho filtros de gravas de 20” cada uno con su filtro de anillos como control y con posibilidad de realizar mantenimientos individuales sin necesidad de suspender el riego. Los filtros de grava permiten retrolavado automático por tiempo y los filtros de anillos son de operación manual, asegurando 120 mesh. Se deben cotizar filtros adicionales si el caudal de la red de goteo lo requiere.

Red de Distribución

Tubería

Desde la caseta principal de filtrado saldrán líneas principales de tubería PVC independientes para goteo y duchas, conectándose a los sectores respectivos.

Cada bloque contará con un registro y una tee en PVC para permitir el lavado de líneas secundarias.

Se deben ubicar válvulas de alivio de aire para protección del sistema.

Medidores de Agua

Cada línea de riego debe disponer de un medidor con pulso de 100 L y una válvula reguladora/sostenedora de presión. Se propone reutilizar los equipos existentes y añadir los necesarios.

Módulos de Válvulas

Los módulos de válvulas para goteo se organizarán con caudales promedio de $25 \text{ m}^3/\text{h} \pm 10 \%$, con líneas de goteo 12 mm / 0,2 / 1 lph / 35 MIL.

Inyección de Fertilizante

El nuevo centro de inyección se ubicará en la caseta Carajillo. Contará con cuatro Venturis para el nuevo sector de riego. Se usarán los cinco tanques existentes y se añadirán dos tanques de 1000 L. Cada tanque tendrá accesorios de llenado y descarga, filtros de control y sistema de agitación neumática.

Automatización

Se realizarán ajustes necesarios en los controladores NMC-PRO según la nueva sectorización del riego. Debe garantizarse la comunicación entre el controlador y el computador MIR-FE, así como la automatización general del sistema.

Anexo 2. Casa de la calidad

		UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE Facultad de Ingeniería en Ciencias Aplicadas Ingeniería Industrial																					
Proyecto: Sistema de riego																							
Voz del Cliente	Voz del negocio	Coeficiente de Utilidad	Tiempo total de riego por zona (horas)	Área (m ²)	Presión (psi)	Caudal (m ³ /h)	Eficiencia global (rótulos)	Costo	Norma ISO 11843.1	Eficiencia de producción (rótulos)	Medida de calidad (ppm)	Tiempo de interrupción por día	Costo (€)	COMPETENCIA				Índice de mejora	Puntero de venta	Logro meta	Promedio	Ponderación en %	
														Norma de calidad	Competencia 1	Competencia 2	Objetivos						
1	Distribución uniforme de agua y nutrientes.	9	3	3	9	9	3	1	0	3	0	0	3	5	5	5	1	0,8	1	5	1	5%	
2	Cumplimiento del tiempo de riego.	3	9	9	9	9	3	1	0	3	3	1	3	5	5	5	5	1	1,5	1	6	10%	
3	Costo al menor espacio posible del costo de instalación.	3	3	9	3	9	3	3	0	3	1	0	0	5	5	5	5	1	1,2	3	3,6	6%	
4	Alarma por cualquier falla.	3	1	0	9	1	3	3	1	0	0	0	0	5	5	5	3	0,60	1,5	3	2,7	5%	
5	Caudal nominal adecuado (100 m ³ /h y 10 m ³ /h).	3	3	3	9	9		3	0	3	1	0	0	5	5	5	5	1,00	1,5	5	7,50	13%	
6	El sistema 120 m ² debe estar en la zona de riego.	1	0	0	0	0	9	0	1	0	0	0	3	5	5	5	2	0,1	1,5	5	3	5%	
7	Automatización completa del sistema.	1	3	9	3	3	0	9	3	1	0	3	9	2	5	5	2	1	1,5	1	6	10%	
8	Seguro.	0	0	1	3	1	0	3	9	1	3	0	3	1	5	5	2	0,5	1,5	3	2,25	1%	
9	Redes separadas para agua y nutrientes.	3	9	3	3	3	3	1	0	9	0	3	3	5	5	5	2	0,1	1,2	5	2,1	1%	
10	Medidas de agua y regulación de presión por zona.	1	0	3	0	1	0	3	3	1	9	0	3	5	5	5	2	0,1	1	1	1,6	3%	
11	Facilitar mantenimiento en el campo al cliente.	3	3	0	0	1	3	3	3	3	0	9	0	3	5	5	5	1,0007	1,5	1	10	17%	
12	Realizar reportes de consumo de agua.	0	0	0	0	3	3	3	9	1	1	0	9	3	5	5	5	1,67	1,5	1	10	17%	
																						100,00	100%
		30	12	12	30	30	12	1	0	12	0	0	12										
		18	5,1	5,1	30	30	12	1	0	18	18	6	18										
		10,8	10,8	12,1	12	30	12	12	0	10,8	3,6	0	0										
		8,1	2,7	0	30	1	12	12	1	0	0	0	0										
		22,5	22,5	22,5	30	30	30	12	0	22,5	7,5	0	0										
		3	0	0	0	0	30	0	1	0	0	0	0										
		0	18	5,1	12	12	0	30	12	0	0	18	0										
		0	0	2,25	12	1	0	12	30	2,25	6,75	0	6,75										
		7,2	21,6	1,2	12	12	12	1	0	21,6	0	7,2	7,2										
		3,6	0	1,8	0	1	0	12	12	3,6	14,1	0	1,8										
		30	30	0	0	1	12	12	12	30	0	90	0										
		0	0	0	0	12	12	12	30	0	0	0	0										
		113,2	171,6	89,15	192	396	156	132	116	111,75	68,25	121,2	103,75	100,3,9									
		7,20%	8,16%	10,17%	16,58%	16,81%	8,60%	7,10%	6,90%	7,10%	3,21%	6,68%	11,11%	100,00%									

Relativa	Valor numérico
Factor	9
Media	3
Desvi	1
Número	0

Relación	Valor
Factor	9
Medio	3
Desvi	1
Programa	0

Figura 48.
Casa de la Calidad

Anexo 3. Plano de conjunto

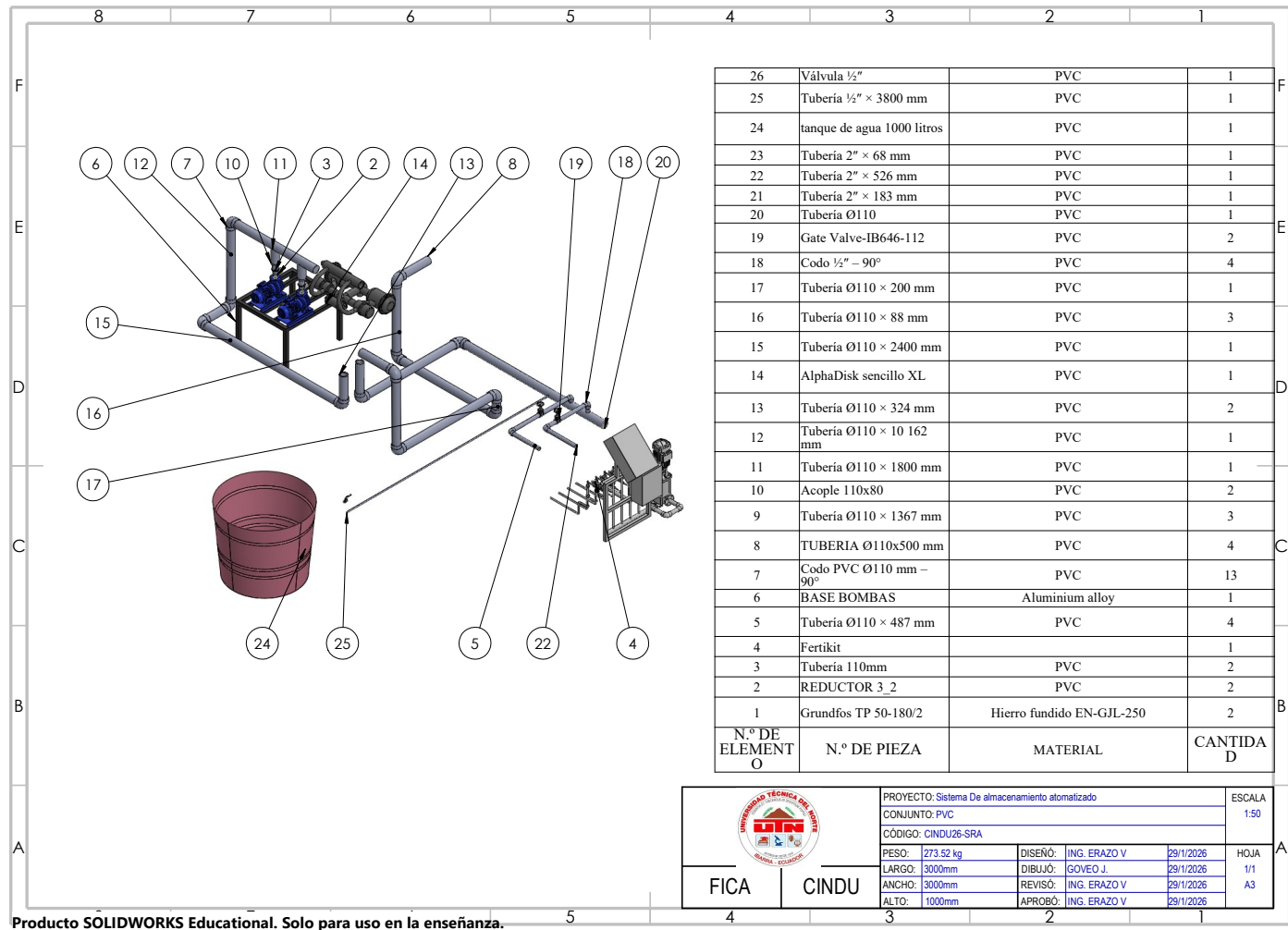


Figura 49.
Plano de conjunto

Anexo 4. Tablas de la verdad

Tabla 93.

Tabla de verdad del permiso del sistema

STOP_NC	Nivel_OK	Permiso_Sistema
0	0	0
0	1	0
1	0	0
1	1	1

Fuente: Elaboración propia

Tabla 94.

Tabla de verdad del llenado del tanque

STOP_NC	Nivel_OK	EV_Llenado_Tanque
0	0	0
0	1	0
1	0	1
1	1	0

Fuente: Elaboración propia

Tabla 95.

Tabla de verdad del encendido de bombas

Permiso_Sistema	START	Bomba_1	Bomba_2
0	0	0	0
0	1	0	0
1	0	0	0
1	1	1	1

Fuente: Elaboración propia

Tabla 96.

Tabla de verdad del sistema de filtrado

Permiso_Sistema	Bomba_1	Bomba_2	EV_Filtrado
0	0	0	0
0	0	1	0
0	1	0	0
1	1	1	1
1	0	0	0
1	0	1	0

Fuente: Elaboración propia**Tabla 97.**

Tabla de verdad del sistema de retrolavado

Permiso_Sistema	Bomba_1	Bomba_2	Presion_Alta	EV_Retrolavado
0	0	0	0	0
0	0	0	1	0
0	0	1	0	0
0	0	1	1	0
0	1	0	0	0
0	1	0	1	0
0	1	1	0	0
0	1	1	1	0
1	0	0	0	0
1	0	0	1	0
1	0	1	0	0
1	0	1	1	0
1	1	0	0	0
1	1	0	1	0
1	1	1	0	0
1	1	1	1	1

Fuente: Elaboración propia

Tabla 98.

Tabla de verdad del sistema Fertikit

Permiso_Sistema	Habilitar_Fertikit	Bomba_Dosificadora
0	0	0
0	1	0
1	0	0
1	1	1

Fuente: Elaboración propia**Tabla 99.**

Tabla de verdad del tanque de mezcla

Permiso_Sistema	STOP_MEZCLA	START_MEZCLA	Motor_Tanque
0	0	0	0
0	0	1	0
0	1	0	0
0	1	1	X
1	0	0	0
1	0	1	1
1	1	0	0
1	1	1	X

Fuente: Elaboración propia

Anexo 5. Plano eléctrico

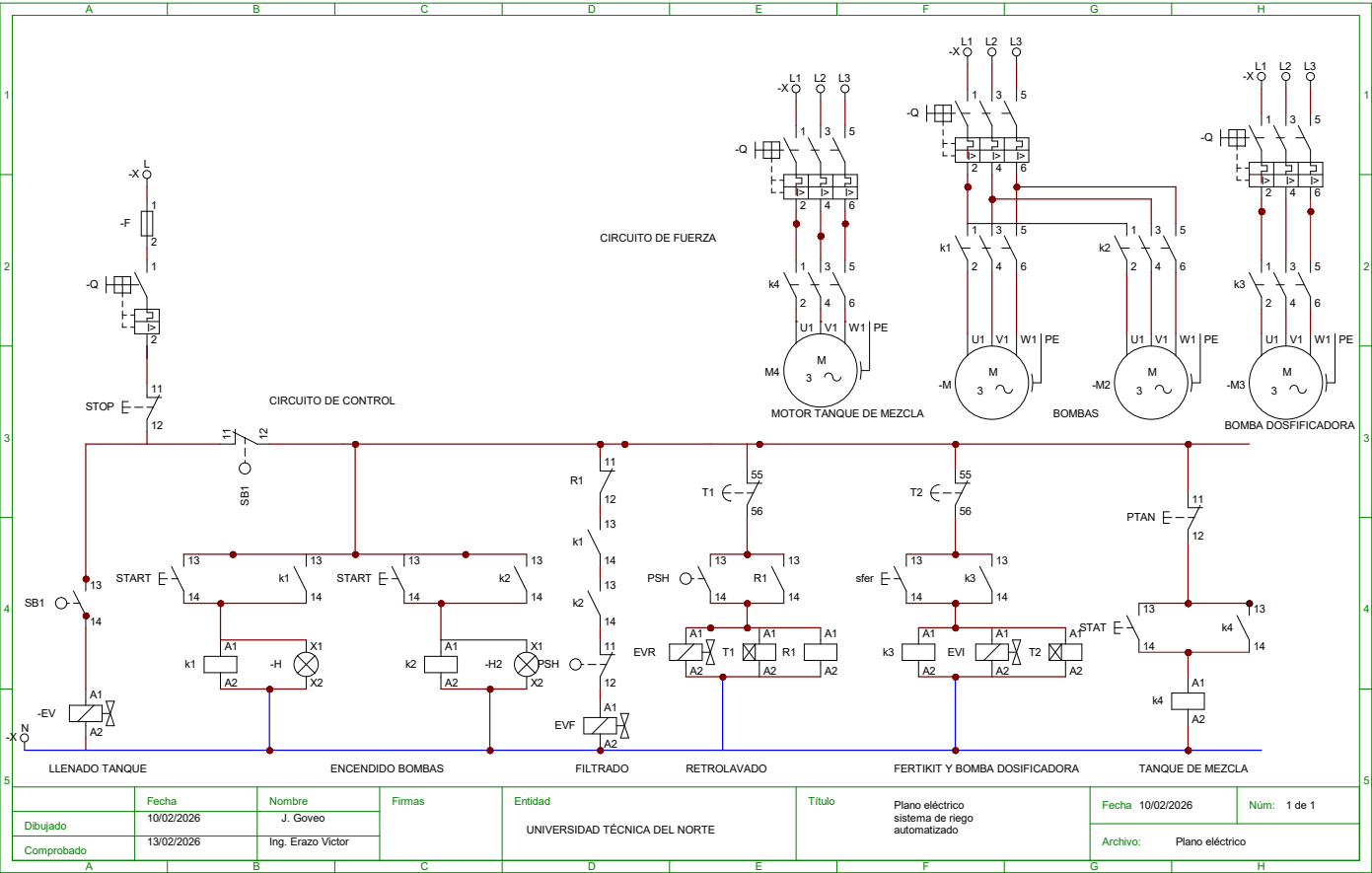


Figura 50.
Plano eléctrico

Anexo 6. Simulación TIA portal

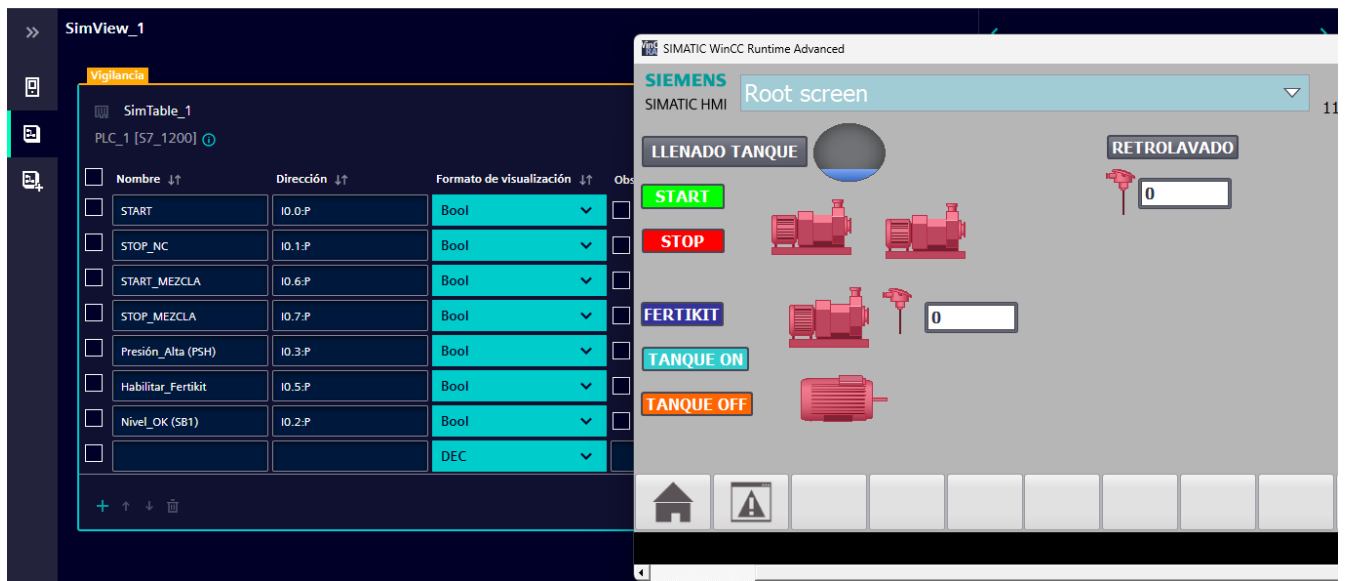


Figura 51.
Simulación HMI: TIA portal

Anexo 7. Protocolo de ensayo

PROTOCOLO DE ENSAYO PARA VALIDACIÓN DE SIMULACIÓN

Objetivo

Verificar la confiabilidad de los resultados obtenidos a través de simulación, mediante la comparación con mediciones realizadas en el sistema real bajo condiciones normales de operación.

PERSONAS A CARGO DE LA PRUEBA

- Javier Goveo.

ACTIVIDADES

Para verificar la confiabilidad del modelo de simulación se realizan las siguientes actividades:

1. Preparar el sistema real en condiciones normales de operación.
2. Verificar el correcto funcionamiento y calibración de los instrumentos de medición.
3. Poner en marcha el sistema.
4. Medir las variables definidas para el análisis (caudal, presión, tiempo, velocidad).
5. Registrar los valores obtenidos durante la operación del sistema.
6. Repetir las mediciones al menos tres veces por cada variable.
7. Calcular el valor promedio de las mediciones realizadas.
8. Comparar los valores experimentales con los resultados obtenidos mediante simulación.

ENTRADAS

- Sistema real en operación.
- Condiciones normales de funcionamiento.
- Instrumentos de medición.

SALIDAS

- Confiabilidad de las simulaciones propuestas

ESQUEMA

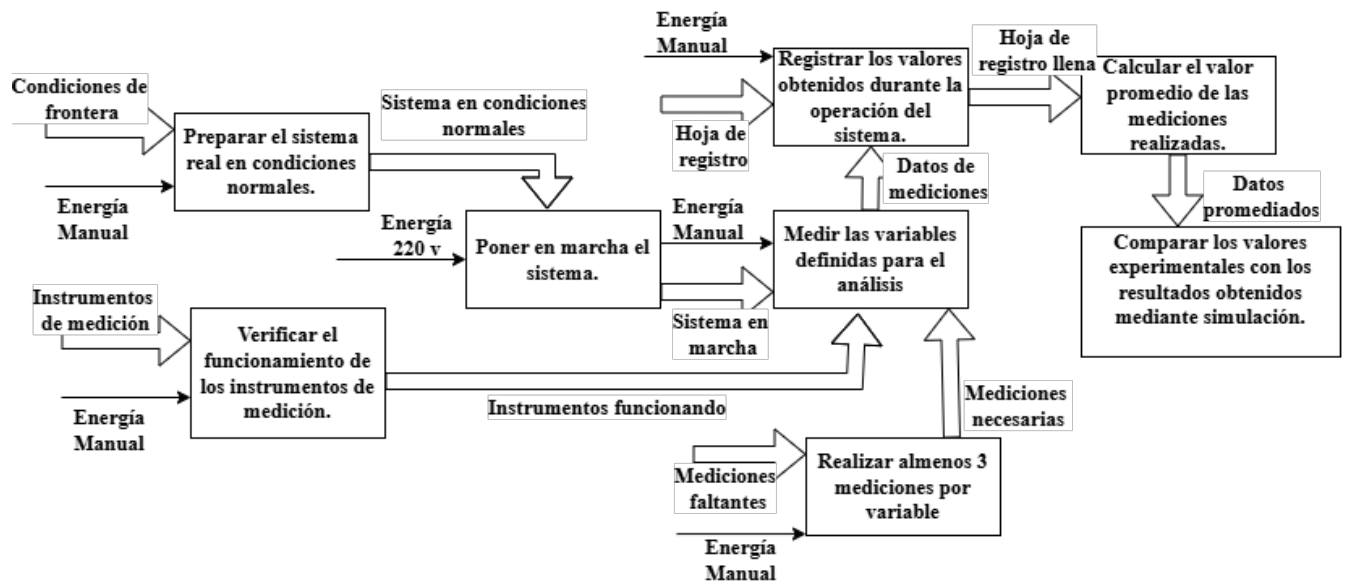


Figura 52.

Diagrama de actividades para la validación del modelo de simulación

OBSERVACIONES

Durante la ejecución del ensayo se observaron posibles variaciones propias del comportamiento real del sistema, tales como pérdidas no consideradas en el modelo de simulación, condiciones no ideales de operación e incertidumbre asociada a los instrumentos de medición. Estas diferencias fueron consideradas en el análisis de los resultados y en la evaluación de la confiabilidad del modelo de simulación.