



UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA CENTROAMERICANA - UNITEC

FACULTAD DE INGENIERÍA

PROYECTO FASE I

**DISEÑO DE UN SISTEMA AUTOMATIZADO DE FERTIRRIEGO POR GOTEO PARA EL
CULTIVO DE CAÑA DE AZÚCAR EN HONDURAS**

PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO

INGENIERA EN MECATRÓNICA

PRESENTADO POR:

11711208 TAYRA LARITZA LACAYO SANCHEZ

ASESOR METODOLÓGICO: ING. MIGUEL ENRIQUE RAMÍREZ ROMERO

CAMPUS TEGUCIGALPA; ABRIL, 2022

DEDICATORIA

A mis padres, por apoyarme en mis aciertos y desaciertos, por forjarme con valores, carácter y darme la libertad necesaria para elegir mi camino. A mis abuelos, por siempre demostrarme su afecto y confianza en mí.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a mis docentes y jefe académico, quienes a lo largo de mi carrera me compartieron sus conocimientos, mismos que hoy dieron pie a la elaboración de este proyecto. Agradezco a mi asesor, quien brindó su asistencia y esclareció mis dudas. Agradezco a mi estimado amigo Ricardo Moncada, quien aportó importantes ideas que enriquecieron esta propuesta.

No existe una demanda de ingenieras como tal, como sí existe para doctoras; pero siempre existe demanda de quien puede hacer un buen trabajo.

EDITH CLARKE

RESUMEN EJECUTIVO

Con el constante incremento de la población mundial, los cambios climáticos y la contaminación, las fuentes de agua han comenzado a secarse, declarándose un estado de emergencia por la escasez de este recurso vital. Honduras no está exento de esta problemática y se afronta a la escasez de agua durante todo el año, situación que se intensifica en los meses de verano. Nuestro país al ser productor agrícola precisa del correcto aprovechamiento de fuentes hídricas para cultivar, promoviendo una eficiente utilización del poco recurso que se tiene.

El fertirriego por goteo representa una excelente solución al problema, la precisa irrigación y nutrición de la planta permiten un adecuado y consciente aprovechamiento del recurso hídrico, además de que beneficia evitando la proliferación de malas hierbas gracias al riego localizado. Un sistema automatizado de fertirriego por goteo permite el control de las bombas, electroválvulas, y el monitoreo de los parámetros ambientales que inciden en la periodicidad de riego de la planta. Este sistema está diseñado para aplicar una lámina de riego de 5mm y cubrir un terreno de 40 hectáreas de plantación de caña de azúcar, además de irrigar, posibilita la aplicación constante de solución fertilizante directamente en el agua de riego, lo que es imprescindible para mantener a la planta nutrida y sana. La aplicación constante de solución fertilizante le permite a la planta aprovechar correctamente estos nutrientes, y permite reducir pérdidas por evaporación o lixiviación.

Se provee de un sistema hidráulico orientado a la reducción de pérdidas por fricción, así como de instrumentación adecuada manejada por un PLC, la obtención de los datos por parte de este se podrá observar y controlar por medio de la HMI del sistema. Cabe destacar, que el diseño planteado es capaz de ser adaptable a cualquier terreno y zona del país, así como a otros tipos de cultivos perennes que se cosechen.

ABSTRACT

With the constant increase in the world population, climate change and pollution, water sources have begun to dry up, declaring a state of emergency due to the scarcity of this vital resource. Honduras is not exempt from this problem and faces water scarcity throughout the year, a situation that intensifies in the summer months. Our country, being an agricultural producer, needs the correct use of water sources to cultivate, promoting an efficient use of the little resource that we have.

Drip fertigation represents an excellent solution to the problem, the precise irrigation and nutrition of the plant allows an adequate and conscious use of the water resource, in addition to helping to prevent the proliferation of weeds thanks to localized irrigation. An automated drip fertigation system allows the control of the pumps, solenoid valves, and the monitoring of the environmental parameters that affect the irrigation frequency of the plant. This system is designed to apply a 5mm irrigation sheet and cover a 40 hectare plot of sugarcane plantations. In addition to irrigating, it enables the constant application of a fertilizer solution in the same irrigation water, which is essential to keep the plant nourished and healthy. The constant application of fertilizer solution allows the plant to take advantage of these fertilizers correctly, it also allows to reduce losses due to evaporation or leaching.

This is provided with a hydraulic system oriented to the reduction of friction losses, as well as adequate instrumentation managed by a PLC, the obtaining of data by this can be monitored and controlled through the system's HMI. It should be noted that the proposed design is capable of being adaptable to any terrain and area of the country, as well as to other types of perennial crops that are harvested.

ÍNDICE DE CONTENIDO

I.	Introducción.....	3
II.	Planteamiento del problema.....	4
2.2	Definición del problema.....	4
2.3	Justificación.....	5
2.4	Preguntas de investigación.....	5
2.5	Objetivos.....	6
2.5.1	Objetivo general.....	6
2.5.2	Objetivos específicos.....	6
III.	Marco teórico.....	8
3.1	Riego por goteo.....	8
3.1.1	Características de Cultivo.....	8
3.1.2	Fuente de Agua.....	9
3.1.3	Control de Plagas.....	9
3.1.4	Ventajas y Desventajas del Riego por Goteo.....	10
3.2	Caña de Azúcar (<i>Saccharum officinarum</i>).....	11
3.2.1	Características.....	12
3.2.2	Etapas de Cultivo.....	13
3.2.2.1	Germinación y Emergencia.....	13
3.2.2.2	Amacollamiento o Ahijamiento.....	13
3.2.2.3	Rápido crecimiento.....	13
3.2.2.4	Maduración.....	14
3.2.3	Programación de Riego.....	14

3.3	Componentes de un Sistemas de Riego por Goteo.....	15
3.3.1	Bomba de Agua.....	15
3.3.1.1	Bomba Sumergible.....	16
3.3.1.2	Bomba No Sumergible.....	16
3.3.2	Filtrado.....	16
3.3.2.1	Filtros de Arena y Grava	16
3.3.2.2	Filtros de Hidrociclón.....	17
3.3.2.3	Filtros de Malla.....	17
3.3.2.4	Filtros de Anilla o Disco	17
3.3.3	Tubería.....	17
3.3.4	Manguera y Gotero.....	19
3.4	Sistema de Fertirriego.....	20
3.5	Componentes Principales de Sistema de Fertirriego	21
3.5.1	Tanque.....	21
3.5.2	Bomba de Inyección	21
3.6	Control Automatizado del Sistema.....	22
3.6.1	Controlador Lógico Programable (PLC)	22
3.6.2	Programación en PLC.....	24
3.6.3	Sensores industriales.....	26
3.6.3.1	Sensores de humedad.....	27
3.6.4	Actuadores industriales.....	29
3.6.4.1	Electroválvulas.....	30
3.6.5	Estación Meteorológica.....	31

3.6.6	Módulo de Radiofrecuencia	32
3.6.7	Paneles Fotovoltaicos.....	33
3.6.8	Conexiones de Control y Potencia.....	34
3.6.8.1	Conexión de Control.....	35
3.6.8.2	Conexión de Potencia	35
3.6.8.3	Tipos de Cableado.....	36
3.6.9	Interfaz Máquina Humano (HMI).....	38
IV.	Metodología.....	39
4.1	Enfoque	39
4.2	Variables de Investigación.....	39
4.3	Técnicas e Instrumentos Aplicados.....	40
4.4	Materiales	41
4.5	Metodología de Estudio.....	42
4.5.1	Análisis del entorno de la producción y automatización de riego de la caña de azúcar en Honduras.....	42
4.5.2	Identificación de trabajos similares sobre riego.....	43
4.5.3	Diseño hidráulico y Selección de bomba	44
4.5.3.1	Cálculo de Potencia de la Bomba Principal.....	46
4.5.3.1	Bomba Booster para Inyección.....	51
4.5.4	Selección de Sensores y Actuadores Industriales.....	52
4.5.5	Conexión de Sensores y Actuadores Industriales	52
4.5.6	Programación de Control Automatizado	53
4.5.7	Comunicación del PLC.....	59

4.6	Metodología de Validación.....	60
4.6.1	Selección de Tubería y Bomba	60
4.6.2	Programación PLC.....	61
4.6.3	Conexiones de control.....	61
4.7	Cronograma de Actividades.....	62
V.	Resultados y análisis	63
5.1	Análisis del entorno de la producción y automatización de riego para caña de azúcar	63
5.2	Identificación de trabajos similares sobre el riego por goteo.....	63
5.3	Determinación del sistema hidráulico	64
5.4	Selección de los sensores y actuadores industriales.....	65
5.5	Programación del controlador lógico programable.....	66
5.6	Estimación de Costos del proyecto.....	74
VI.	Conclusiones	76
VII.	Recomendaciones.....	78
VIII.	Aplicabilidad.....	79
IX.	Evolución del Trabajo Actual.....	80
	Bibliografía.....	81
	Anexos.....	86

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1. Ventajas y Desventajas del Riego por Goteo.....	10
Ilustración 2. Análisis aproximado del comportamiento de diferentes sistemas de riego	11
Ilustración 3. Componentes presentes en la caña de azúcar	12
Ilustración 4. Etapas de cultivo de caña.....	14
Ilustración 5. Tubo de PVC-U	18
Ilustración 6. Tubos de PE.....	19
Ilustración 7. Tanque Rotoplas 2500L	21
Ilustración 8. Bombas Booster.....	22
Ilustración 9. Estructura interna de un PLC	24
Ilustración 10. Programa en lenguaje escalera	25
Ilustración 11. Programación en bloques de función.....	25
Ilustración 12. Programa en lista de instrucciones.....	26
Ilustración 13. Componentes de una Electroválvula.....	30
Ilustración 14. Estación Meteorológica.....	32
Ilustración 15. Módulo radio RAD-2400-IFS.....	33
Ilustración 16. Circuito de control.....	35
Ilustración 17. Circuito de potencia.....	36
Ilustración 18. Selección diámetro de línea de succión y descarga.....	46
Ilustración 19. Cálculo de ha, pa y pi.....	48
Ilustración 20. Cálculo de ha, pa y pi con nuevos diámetros	49
Ilustración 21. Goulds Pump 3656 series	50
Ilustración 22. Curva de rendimiento Bomba 20BF 4x6-16.....	50

Ilustración 23. Rango de operación de Bomba Goulds Booster Serie SV.....	51
Ilustración 24. Direccionamiento de entradas digitales y analógicas PLC PM564	54
Ilustración 25. Direccionamiento salidas digitales PLC PM564.....	54
Ilustración 26. Direccionamiento salidas digitales Módulo DO561	55
Ilustración 27. Programación en CFC encendido y apagado del sistema.....	55
Ilustración 28. Programación en CFC de bombas.....	56
Ilustración 29. Programación en CFC de válvulas de filtrado	56
Ilustración 30. Programación en CFC de válvulas de seccionamiento	57
Ilustración 31. Bloques de función para linealización de sensores	57
Ilustración 32. Parámetros para linealización de sensores	58
Ilustración 33. Diseño de HMI	58
Ilustración 34. Configuración maestro protocolo de comunicación	59
Ilustración 35. Configuración Esclavo protocolo de comunicación	60
Ilustración 36. Mapeo de señales del esclavo	60
Ilustración 37. Cronograma de Actividades	62
Ilustración 38. Diagrama de bloques del sistema	65
Ilustración 39. Sistema en Paro.....	66
Ilustración 40. Energizado del Sistema	67
Ilustración 41. Arranque de bomba principal.....	68
Ilustración 42. Apertura de electroválvula del turno 1 y fertirriego activado.....	69
Ilustración 43. Apertura de electroválvula turno 2	69
Ilustración 44. Apertura de electroválvula turno 3	70
Ilustración 45. Apertura de electroválvula turno 4	70

Ilustración 46. Apertura de electroválvula para retrolavado filtro 1	71
Ilustración 47. Apertura de electroválvula para retrolavado filtro 2	72
Ilustración 48. Apertura de electroválvula para retrolavado filtro 3	72
Ilustración 49. Apertura de electroválvula para retrolavado filtro 4	73
Ilustración 50. Sistema en Paro de Emergencia.....	73
Ilustración 51. Estimación de Costos del Proyecto.....	75

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Coeficiente de Cultivo	15
Tabla 2. Tipos de Mangueras según la presión	19
Tabla 3. Tipos de sensores de humedad.....	27
Tabla 4. Tipos de Actuadores	29
Tabla 5. Tipos de Electroválvulas.....	31
Tabla 6. Tipos de Paneles Fotovoltaicos.....	34
Tabla 7. Tipos de aislamiento para conductores eléctricos	37
Tabla 8. Amperaje soportado por cables de cobre.....	37
Tabla 9. Resumen de cálculos para determinación del flujo requerido	44
Tabla 10. Características de operación Bomba Centrífuga.....	51
Tabla 11. Características Bombas Booster Serie SV	51

ÍNDICE DE ECUACIONES

Ecuación 1. Evapotranspiración del cultivo	15
Ecuación 2. Volumen de agua requerido.....	45
Ecuación 3. Total de goteros por cinta	45
Ecuación 4. Flujo requerido.....	45
Ecuación 5. General de la Energía.....	47

ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo 1. Visita técnica a Compañía Azucarera.....	86
Anexo 2. Tablas para determinación del sistema hidráulico	91
Anexo 3. Diseño de línea de descarga del sistema.....	96
Anexo 4. Consigna de programación.....	98
Anexo 5. Levantamiento de señales.....	99
Anexo 6. Diagrama P&ID del Sistema de Fertirriego	100
Anexo 7. Diagramas de conexión PLC.....	101
Anexo 8. Cotizaciones	102

LISTA DE SIGLAS

FAO	Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y Alimentación.
PLC	Programmable Logic Controller (Controlador Lógico Programable).
PNUD	Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo.
UNESCO	Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura.

GLOSARIO

1. Agrometeorología: es la ciencia que estudia las condiciones meteorológicas, climáticas e hidrológicas y su interrelación en los procesos de la producción agrícola. (Mormeneo, 2007)
2. Controlador lógico: es aquel que realiza funciones lógicas, combinacionales y secuenciales, mediante la programación adecuada introducida al equipo. (Álvarez Pulido, 2007)
3. Cultivos perennes: son aquellos que tienen ciclos muy largos, ya que su periodo de vida vegetativo se puede extender a más de un año. (Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera, 2018)
4. Evapotranspiración: es la combinación de dos procesos, la evaporación desde el suelo y desde la superficie cubierta por las plantas, y la transpiración desde las hojas de las plantas. Su cálculo se usa para saber el agua que necesitan las plantas para su correcto desarrollo. (SiAR, 2016)
5. Fertirrigación: se le conoce como fertirriego a la combinación de agua y fertilizantes para nutrir los cultivos. (Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera, 2016)
6. Follaje: conjunto de hojas de los árboles y de otras plantas. (RAE, 2022).
7. Irrigación: acción de aplicar riego a un terreno. (RAE, 2022)
8. Lixiviación: acción y efecto de lixiviar. Consiste en tratar una sustancia compleja con un disolvente adecuado para separar sus partes solubles de las insolubles. (RAE, 2022)
9. Riego por goteo: consiste en la aplicación de agua en forma lenta y en pequeñas cantidades dirigidas directamente a la zona radicular de las plantas. (Bustamante, 2004)

I. INTRODUCCIÓN

El primer proyecto de riego a gran escala se construyó en Egipto, se utilizaron presas y canales para dirigir las aguas de inundación del río Nilo hacia el lago Moeris y así poder irrigar los cultivos que se tenían. Más tarde aparecieron las tuberías de cemento y roca, los acueductos en Roma, gracias a esta invención de los romanos, se transportaba el agua salvando los desniveles del terreno. Tiempo después se comenzaron a establecer regulaciones sobre la distribución del agua y la responsabilidad de los agricultores de realizar mantenimiento de los canales de las propiedades, se desarrollaron tecnologías para retener la humedad en la tierra y permitir almacenamientos de agua.

El riego por goteo es un sistema en el cual el agua se distribuye por mangueras que requieren determinada presión para realizar de manera adecuada su tarea, además permite irrigar los cultivos según el tipo de suelo y las necesidades de este. Al suministrar el agua de manera constante y uniforme, se permite aprovechar el recurso de una manera eficiente.

El presente proyecto propone una mejora de rendimiento en el sistema de riego y mitigación de efectos negativos al considerar los parámetros ambientales para definir el mejor momento para irrigar los cultivos. Esto conduce a un ahorro de agua que no es posible conseguir implementado otros sistemas de riego. Con este sistema se propone una evolución al fertirriego, que es la aplicación de las soluciones fertilizantes a la planta de manera constante por medio del sistema de riego original realizándole una pequeña adecuación, lo que permite a la planta una mayor absorción de la solución aplicada.

Este sistema fusiona los componentes del sistema hidráulico con los componentes de automatización que permiten el control y el monitoreo de la irrigación. Dejando esta tecnología como punto de partida para el sistema agrícola en Honduras, puede ser adaptada a otra clase de cultivos perennes y a otro tipo de terrenos tomando las consideraciones hidráulicas pertinentes para tener éxito en las aplicaciones.

II. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

2.1 PRECEDENTES DEL PROBLEMA

La técnica del riego por goteo es la innovación más importante en agricultura desde la invención de los aspersores en los años 30, poco a poco se han ido añadiendo mejoras para evitar los problemas que podrían tener este tipo de sistemas, posicionándolo como uno de los sistemas de riego más eficientes en la actualidad.

Honduras es un país productor bien dotado de tierras que tiene a la agricultura como una de las industrias más importantes en la economía actual, posee alrededor de 1,8 millones de hectáreas de tierra cultivable. El cultivo de caña representa uno de los pilares fundamentales que sostienen la economía del país, esta permite producir cerca de once millones de quintales de azúcar anualmente, siendo de los rubros que más genera divisas beneficiando así a la población en general, como bien afirma la ANDI.

La agroindustria de la caña de azúcar en Honduras es uno de los pilares fundamentales que sostienen la economía del país, convirtiéndose en el máximo generador de empleo en la población económicamente activa que habita en las áreas de influencia donde operan los ingenios azucareros, lo que representa el 44% de oferta laboral en esas regiones. (ANDI, 2020)

Tomando en consideración las condiciones climáticas y la escasez de agua en el país, este sistema está diseñado para permitir un óptimo manejo de los recursos hídricos disponibles, es por esto que el sistema presentado al estar monitoreando las condiciones ambientales en tiempo real permite al usuario decidir sobre el momento necesario de irrigación, sin asfixiar ni estresar a la planta con la que se está trabajando.

2.2 DEFINICIÓN DEL PROBLEMA

La importancia de realizar una acertada irrigación en los cultivos durante cada una de sus etapas de crecimiento, radica en el florecimiento de la planta y los nutrientes que contendrán sus raíces. Por esta razón diseñar un sistema de fertirriego por goteo automatizado, resulta en una solución muy acertada para registrar variables ambientales, monitorizar y darle seguimiento de manera eficiente a las necesidades de las plantas para su supervivencia y mayor rendimiento. Tomando

en cuenta la situación de emergencia por la escasez de agua en Honduras, resulta de suma importancia no desperdiciar la poca agua que se tiene, con este tipo de sistemas se puede garantizar que solo se utilizará el agua necesaria para el óptimo desarrollo de los cultivos. En Honduras, los sistemas de riego que se tienen en las fincas son completamente manuales y se necesita mucha mano de obra para echarlos a andar.

La caña de azúcar es un pasto gigante de tallo macizo que contiene jugo rico en azúcar, este se extrae y se cristaliza mediante un proceso químico que termina en la azúcar que conocemos. Es cultivada en zonas tropicales y subtropicales, su periodo de crecimiento varía según la clase de caña, se adapta a una amplia variedad de suelos, lo más importante es que estos suelos sean profundos y con buen drenaje.

2.3 JUSTIFICACIÓN

Un sistema de fertirriego automatizado al brindar precisión nos reduce la proliferación de malas hierbas en los cultivos, lo que permite un aporte controlado de nutrientes en el agua de riego con posibilidad de modificarlas en cualquier etapa de cultivo. Estos sistemas son adaptables tanto a terrenos planos, como con pendientes pronunciadas e irregulares.

Cuando las plantas se irrigan con demasiada agua, las raíces de esta no obtienen suficiente oxígeno, lo que causa la asfixia radicular. Este exceso provoca que los tejidos de las raíces se pudran y las plantas mueran, causando pérdidas monetarias a la industria agrícola.

Al realizar la irrigación tomando en cuenta las condiciones ambientales y las necesidades de la planta, se puede reducir la evaporación de agua del suelo, lo que a su vez reduce de manera significativa las necesidades de agua de la planta y se le da un correcto aprovechamiento al recurso hídrico tal como lo afirma la siguiente cita:

“La variabilidad de la humedad del suelo afecta de manera directa el crecimiento de las plantas, si hay baja absorción de agua se reduce la absorción de nutrientes y el cultivo tiene menor tasa de crecimiento” (Universidad de Illinois, 2013).

2.4 PREGUNTAS DE INVESTIGACIÓN

- ¿Qué impacto tiene el riego por goteo en la agricultura?
- ¿Qué variables se deben tomar en cuenta para decidir el momento óptimo de riego de un cultivo?
- ¿Qué filtros se utilizan en el agua para riego de cultivos?
- ¿Qué bomba de agua se necesita para tener menores pérdidas y mayor eficiencia en el sistema hidráulico del riego?
- ¿Qué tipo de sensores son adecuados para utilizar según el tipo de suelo del cultivo?
- ¿Qué fuente de alimentación voy a utilizar para mis sensores en el campo?
- ¿Qué método es eficiente para el control automatizado de este tipo de sistemas?
- ¿Qué tipo de actuadores son necesarios para un sistema de fertirriego por goteo?
- ¿Qué precio conllevaría realizar un diseño automatizado de riego por goteo para un terreno plano de aproximadamente cuarenta hectáreas?

2.5 OBJETIVOS

2.5.1 OBJETIVO GENERAL

Diseñar un sistema de riego por goteo automatizado equipado con un sistema de fertirrigación para la producción de caña de azúcar en un área de cultivo de cuarenta hectáreas, monitoreando en tiempo real los parámetros ambientales que inciden de forma directa e indirecta en el cultivo durante el primer trimestre del año 2022.

2.5.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1. Analizar el entorno de la producción y automatización de riego de la caña de azúcar en Honduras.
2. Identificar trabajos similares con la automatización de sistemas de riego por goteo para la producción de caña de azúcar.
3. Establecer el diseño hidráulico y determinar la bomba que mejor se adecue a las necesidades del sistema de riego.

4. Seleccionar los sensores y actuadores industriales adecuados para el sistema de riego planteado.
5. Especificar las conexiones del control lógico con los sensores y actuadores seleccionados previamente.
6. Realizar la programación de control automatizado que garanticen el riego óptimo en cada fase de crecimiento de la caña de azúcar.
7. Determinar la forma de comunicación de datos de los sensores en campo con el controlador automatizado.
8. Realizar una estimación de costos del sistema de riego por goteo automatizado con el sistema de fertirriego.

III. MARCO TEÓRICO

3.1 RIEGO POR GOTEO

El riego por goteo es un método de irrigación que permite una delicada aplicación de agua y fertilizantes en los sistemas agrícolas, es uno de los sistemas más eficientes en la actualidad porque permite distribuir homogéneamente el agua en el cultivo. El agua se infiltra en el suelo irrigando directamente la zona de influencia radicular a través del sistema hidráulico.

El agua y los nutrientes que necesitan los cultivos, se entregan a través de un sistema de tuberías llamadas "líneas de goteo", dichas líneas cuentan con dispositivos llamados "goteros". Cada uno de estos emite un flujo de agua controlado para realizar la irrigación de manera uniforme. (NETAFIM, 2022)

El rendimiento de los cultivos aumenta gracias a la mejor administración del agua utilizando este sistema. Comparado con otros tipos de riego, el consumo de agua se reduce en grandes cantidades, lo que da pie a un sistema con múltiples beneficios, siempre y cuando éste sea diseñado y mantenido de manera óptima.

La relación del agua benéficamente utilizada en los cultivos y el agua total utilizada en la práctica del riego por goteo representa un 90-95%, a diferencia de los otros tipos de riego que representan una relación menor al 90%. Aparte de eso, se puede controlar bien la cantidad de agua aplicada a través de la relación caudal/tiempo de los goteros o por el consumo en la estructura de almacenamiento. Sin embargo, si los goteros son improvisados, adaptados o a la presión entre ellos es desigual, la distribución del agua en cada uno de ellos es diferente; por lo tanto, se aplica más agua en algunos puntos del área que en otros. (Vieira, 2008)

Esto demuestra la eficiencia de la práctica de riego por goteo, no obstante, es importante tener en cuenta detalles cómo el tipo de goteros y la presión en los mismos, pues esto afecta grandemente la aplicación del agua en el área y resta eficiencia.

3.1.1 CARACTERÍSTICAS DE CULTIVO

El riego por goteo se adapta mejor a aquellos cultivos de espaciamiento amplio, en donde sus sistemas radiculares no abarcan todo el volumen del suelo, por lo tanto, el riego localizado resulta más eficiente. Que los cultivos sean altos, frondosos, bajos, o de escaso follaje, no tiene importancia para este tipo de riego. (Vieira, 2008)

En teoría, el riego por goteo se puede aplicar a cualquier tipo de cultivo, tomando en cuenta que se aprovecha mejor en cultivos de espaciamiento amplio, como ser la caña de azúcar.

3.1.2 FUENTE DE AGUA

Los recursos hídricos son definidos por la UNESCO, como: Recursos disponibles en cantidad y calidad suficientes para satisfacer una demanda agua identificable. La cantidad y disposición de estos recursos depende meramente de la región geográfica. En la actualidad, la escasez del agua afecta a más del 40% de la población mundial, según datos del PNUD esta cifra crecerá con el aumento de las temperaturas globales causadas por el cambio climático. Es por esto que es necesario realizar inversiones adecuadas en infraestructura que permitan el óptimo y consciente aprovechamiento del recurso disponible.

El agua de riego puede provenir de diversas fuentes, ríos, lagos, pozos o proveedores de agua. Dependiendo de dónde se obtenga, habrá que tomar en consideración qué tipo de filtros serán utilizados realizando previamente pruebas de campo, esto por las bacterias que dicha agua puede contener y que pueden contaminar nuestro cultivo, o incluso por las partículas que pueden obstruir nuestro sistema hidráulico.

El agua de superficie de los arroyos y estanques contiene bacterias, algas y otras formas de vida acuática, lo que hace absolutamente necesario usar filtros de arena, los cuales son más caros. Los proveedores de agua municipales generalmente proporcionarán resultados de las pruebas de calidad del agua, por lo que es más fácil detectar potenciales problemas. (Harper, 2016)

3.1.3 CONTROL DE PLAGAS

Al utilizar riego por goteo, como el agua solo se aplica directamente a la planta y no a las zonas no cultivadas, se reduce la posibilidad de presencia de insectos auxiliares que son los que contribuyen al control biológico de las plagas. Además de esto, se pueden aplicar químicos que

impidan la proliferación de malas hierbas que absorban el agua y los nutrientes de nuestros cultivos. (Futurcrop, 2020)

3.1.4 VENTAJAS Y DESVENTAJAS DEL RIEGO POR GOTEO

En la ilustración 1 tenemos las ventajas y desventajas de los sistemas de riego por goteo. Como se observa, las ventajas de la aplicación de estos sistemas son muchas más que las desventajas, lo que significa que trae consigo muchos beneficios e incluso reducción de pérdidas monetarias.

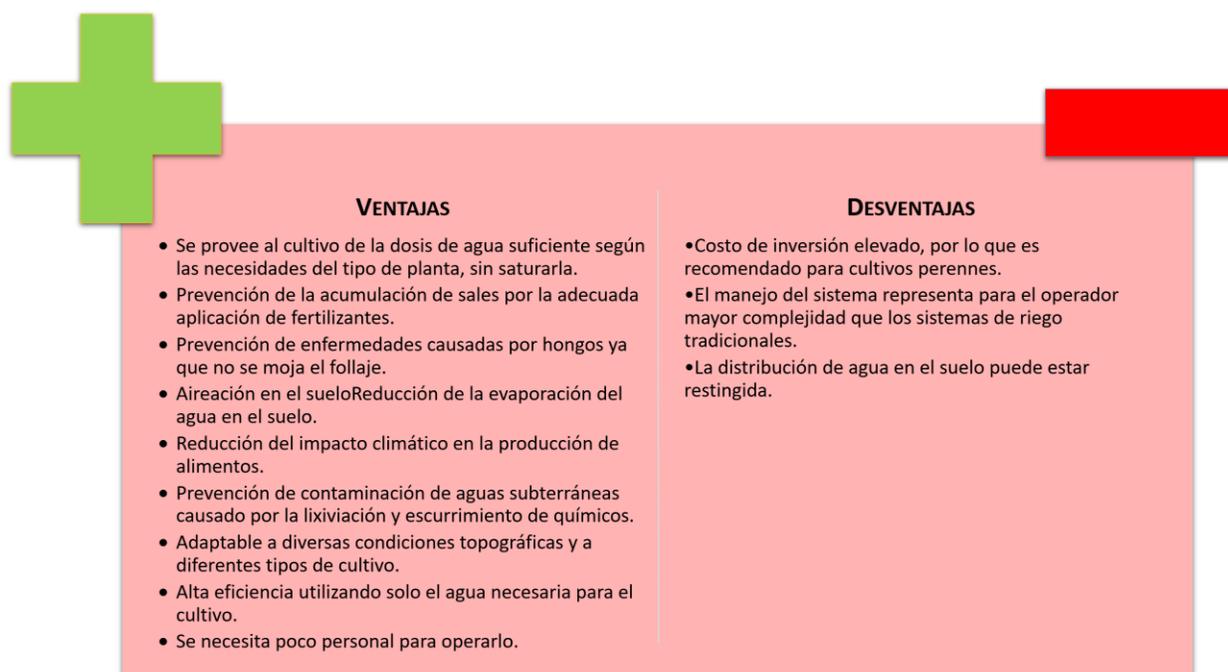


Ilustración 1. Ventajas y Desventajas del Riego por Goteo

Fuente: (Bustamante, 2004)

Para un poco más de contexto, en la ilustración 2 se analiza el comportamiento de distintos sistemas de riego contra el riego por goteo según diversos indicadores de sostenibilidad. Dentro de la tabla calificamos a los indicadores, "Baja" representa una ventaja, "Alta" una desventaja y "Mediana" un punto intermedio entre los dos anteriores. Queda a criterio del lector opinar sobre qué sistema cree más conveniente y eficiente.

Indicadores de sostenibilidad	Sistema de Riego		
	Inundación	Aspersión	Goteo
Inversión inicial	Baja	Mediana	Alta
Utilización de mano de obra en la operación	Alta	Mediana	Baja
Riesgo de erosión en zonas de laderas	Alta	Mediana	Baja
Necesidad de energía para distribuir el agua	Baja	Alta	Mediana
Consumo de agua	Alta	Mediana	Baja
Control de consumo de agua	Alta	Baja	Baja
Transmisión de enfermedades	Alta	Alta	Baja
Posibilidades de generar conflicto por el agua	Alta	Mediana	Baja
Riesgo de ineficiencia energética	Alta	Mediana	Baja
Posibilidades de consumo de plaguicidas	Alta	Alta	Baja

Ilustración 2. Análisis aproximado del comportamiento de diferentes sistemas de riego

Fuente: (Vieira, 2008)

3.2 CAÑA DE AZÚCAR (SACCHARUM OFFICINARUM)

La caña de azúcar es un cultivo perenne, pertenece a la familia de las gramíneas. Posee un tallo rico en azúcar de entre 2 y 5 metros de altura, con 5 o 6 centímetros de diámetro. Su período de crecimiento varía según la variedad de la caña y la zona de cultivo, pero puede extenderse hasta por 24 meses. En 2016 fue declarado el cultivo agrícola más importante del planeta por la UNESCO.

Según la Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural de México, la caña de azúcar es considerada una de las fuentes energéticas más económicas para el hombre, esto al ser uno de los cultivos con mayor capacidad para convertir la energía solar en biomasa. Existiendo 4 variedades, que son; criolla, cristalina, violeta y veteadas. (Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural, 2016)

Y es que la caña de azúcar no sirve solo para producir azúcar, su jugo rico en nutrientes es ingrediente principal de diversas bebidas fermentadas. Sumando a sus funcionalidades, la caña de azúcar es capaz de generar energía limpia, se utiliza el bagazo de esta para alimentar las plantas de biomasa. En la ilustración 3, podemos observar los componentes que se encuentran presentes en la caña de azúcar.

Componente	Porcentaje
Agua	73 - 76 %
Sacarosa	8 - 15 %
Fibra	11 - 16 %

Componente	Porcentaje
Glucosa	0,2 - 0,6 %
Fructosa	0,2 - 0,6 %
Sales	0,3 - 0,8 %
Ácidos orgánicos	0,1 - 0,8 %

Ilustración 3. Componentes presentes en la caña de azúcar

Fuente: (Zambrano, 2019)

“Honduras produce más de cinco millones de toneladas anuales de caña de azúcar, cultivadas a lo largo y ancho de más de 80 mil manzanas (55 mil hectáreas) de tierra alrededor del país” (FUNDAHRSE, 2016).

Por lo anterior mencionado, podemos decir que la caña de azúcar es un cultivo de suma importancia en Honduras, provee de muchas fuentes de trabajo a la población en diversas áreas. En los departamentos de Atlántica, Colón, Gracias a Dios, Copán, Santa Bárbara, Yoro, Ocotepeque, Lempira, Comayagua, El Paraíso y Francisco Morazán se cultiva la caña de azúcar, a nivel de ingenios y de agricultores independientes.

3.2.1 CARACTERÍSTICAS

Al momento de cultivar la caña de azúcar, es necesario cuidar las condiciones de suelo, temperatura, clima, humedad y luminosidad, a continuación se detalla:

- Suelo: los suelos ideales son los franco arcillosos, que tengan buen drenaje y profundidad, teniendo un pH óptimo de 5.5 a 8. Precisa de una suficiente cantidad de calcio, nitrógeno, fósforo y potasio.

- Temperatura: el rango óptimo de temperatura oscila entre 26 y 34°C, no soporta temperaturas bajo 0°C. Las temperaturas altas le permiten alcanzar un crecimiento vegetativo alto.
- Clima y humedad: las condiciones climáticas ideales se encuentran en zonas tropicales, aunque también se siembra en zonas cálidas y subtropicales. Los climas nublados perjudican el desarrollo de la planta. Si se tiene una humedad relativa de entre 80 y 85% se favorece la rápida elongación del tallo.
- Luminosidad: esta planta requiere de una excelente iluminación (de entre 6 a 14 horas diarias de luz solar) para incrementar en ella la producción y acumulación de azúcares. Es importante tomar en cuenta que la sombra producida por la parte superior de la planta disminuye la capacidad fotosintética del cultivo, por lo que hay que considerar la densidad de población que se puede cultivar.

3.2.2 ETAPAS DE CULTIVO

La caña de azúcar cuenta con 4 etapas principales de crecimiento del cultivo propuestas por la FAO, serán mencionadas a continuación:

3.2.2.1 *Germinación y Emergencia*

Esta etapa inicia a los 7 o 10 días después de la siembra de la caña. El crecimiento inicial se prolonga hasta los 35 días. La germinación está influenciada por la humedad, temperatura, aireación del suelo, humedad del esqueje, condición de la yema y la época de plantación.

3.2.2.2 *Amacollamiento o Ahijamiento*

El amacollamiento es el proceso de ramificación subterránea originado a partir de las articulaciones nodales del tallo primario, esto le da al cultivo un número de hojas activas adecuado. Esta etapa comienza alrededor de los 35 a 40 días después de la plantación, y dura entre 50 y 90 días; es una fase de gran importancia en la definición del rendimiento, ya que en su transcurso se establece el número potencial de órganos cosechables.

3.2.2.3 *Rápido crecimiento*

Durante esta etapa se da la formación y elongación de la caña con rapidez, asimismo, la planta alcanza su máxima área foliar, aumenta la biomasa y el número de tallos por área. Para el buen desarrollo del sistema radical, es necesario que exista una humedad óptima, para así permitir la absorción de nutrientes. Esta etapa puede prolongarse según la variedad, la temperatura y la humedad, puede durar entre 180 y 230 días.

3.2.2.4 *Maduración*

En esta etapa el desarrollo de la planta de caña, se suspende su crecimiento y se da el proceso de síntesis y acumulación de energía en forma de sacarosa. La maduración de la caña es de la base al ápice (extremo superior) de la planta, es por esto por lo que la parte basar contiene más azúcar que la parte superior. Esta parte del desarrollo tiene una duración de unos 2 a 3 meses antes de la cosecha, se requiere poca lluvia y bastante luminosidad. En la ilustración se pueden observar representadas todas las fases de crecimiento de la caña de azúcar.

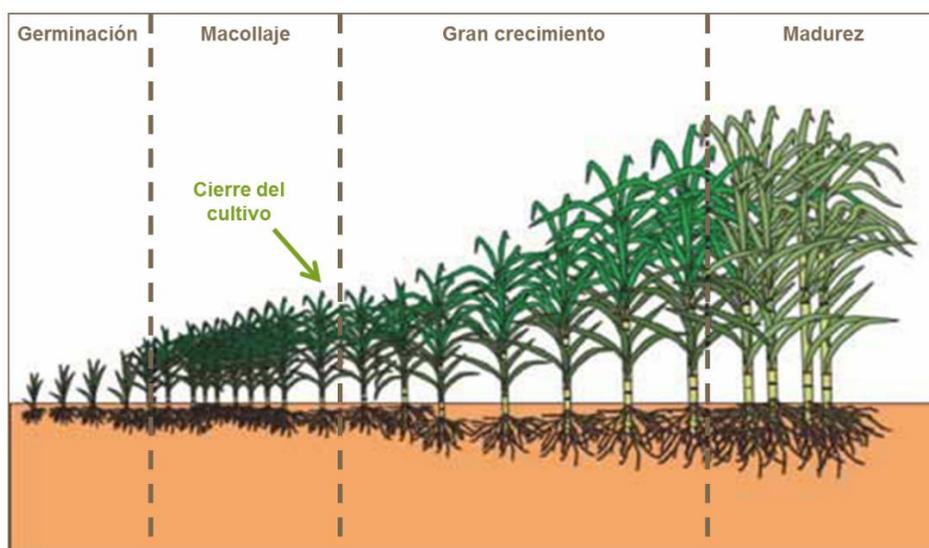


Ilustración 4. Etapas de cultivo de caña

Fuente: (Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural, 2019)

3.2.3 PROGRAMACIÓN DE RIEGO

La programación del riego hace referencia a la cantidad y frecuencia de la aplicación de agua a un cultivo. Para poder determinar la frecuencia de riego de la caña de azúcar, es importante saber que el requerimiento diario de agua se calcula como se muestra en la ecuación 1, en función de

la evapotranspiración del cultivo (E_{Tc}), evapotranspiración del cultivo de referencia (E_{To}) y el coeficiente de cultivo (K_c), este último varía según la etapa de crecimiento.

$$E_{Tc} = K_c * E_{To}$$

Ecuación 1. Evapotranspiración del cultivo

Fuente: (Orellana, 2008)

La FAO, a través de una serie de estudios y recopilación de bibliografía de diversos autores, determinó como estándar el coeficiente de cultivo de la caña de azúcar, según su etapa de crecimiento, dichos datos se pueden encontrar en la tabla 1.

Tabla 1. Coeficiente de Cultivo

Etapa	Inicial	Media	Final
K_c	0.4	1.25	0.75

Fuente: (FAO, 2000)

Tradicionalmente se ha utilizado el cálculo de la evapotranspiración del cultivo para determinar la lámina de riego que este necesita, actualmente la decisión de cuando irrigar las plantas se toma de la mano de este cálculo y los datos de humedad en tiempo real del suelo en el que se encuentra sembrada la planta.

3.3 COMPONENTES DE UN SISTEMAS DE RIEGO POR GOTEO

3.3.1 BOMBA DE AGUA

“Una bomba es una máquina hidráulica que convierte la energía mecánica en energía hidráulica, produciéndose un aumento de velocidad de la presión del líquido en circulación” (Moreno Castro, 2011).

Una bomba de agua en instalaciones de riego se utiliza para suministrar el caudal necesario y la presión requerida en la red de tuberías para el riego. Existen dos tipos de bombas en función de la altura de aspiración que tienen, dependiendo de los modelos y especificaciones varían en eficiencia y vida útil.

3.3.1.1 *Bomba Sumergible*

Se instalan cuando la altura de aspiración es elevada, estas actúan al hundirse en el fluido que se requiere bombear, son siempre eléctricas. Son las bombas más utilizadas ya que son versátiles y de bajo consumo energético. Siempre se debe tomar en cuenta el tipo de líquido a bombear, la altura de la tubería de descarga, el largo, la inmersión máxima, materiales y caudal.

3.3.1.2 *Bomba No Sumergible*

Se instalan cuando la altura de aspiración es baja o directamente no hay, en la superficie del terreno. Son de menor costo ya que no precisan del blindaje especial de las sumergibles. Estas juegan un papel muy importante en la distribución de agua potable y movimiento de diversas sustancias en la industria.

Estas bombas, a su vez también se clasifican por la posición del eje de accionamiento, distinguiendo entre dos.

- *Bombas Horizontales:* se emplean para suministrar bajas presiones y elevados caudales. Comúnmente se instalan en los cabezales de riego.
- *Bombas Verticales:* se emplean para suministrar presiones elevadas.

3.3.2 FILTRADO

Los filtros son parte fundamental de un sistema de riego por goteo, puesto que uno de los problemas que puede presentarse es la obstrucción en la salida de los goteros. Existen diversos agentes que pueden causar estas obstrucciones, como ser:

- Partículas minerales: arena, arcilla, limos.
- Partículas orgánicas: algas, restos animales, restos vegetales.
- Precipitados químicos: sal, fertilizantes.

Se pueden emplear tres tipos de filtros según su función.

3.3.2.1 *Filtros de Arena y Grava*

Los filtros de arena son tanques metálicos que contienen una capa de arena generalmente sílicea en su interior. Esta arena ofrece buena resistencia a la rotura del grano, lo que impide que esta se desintegre con el uso.

3.3.2.2 Filtros de Hidrociclón

Los filtros de hidrociclón permiten la retención de partículas con peso específico superior al del agua por defecto de la fuerza centrífuga que se ejerce sobre el flujo. El agua entra al filtro de manera tangencial, lo que provoca que se genere un vórtice que va descendiendo por el cuerpo del filtro. Las partículas retenidas se acumulan en un depósito inferior que se debe drenar conforme aumenta el volumen de sedimento retenido. Sirven para situaciones donde el agua presenta arena, estos filtros son utilizados particularmente cuando la extracción de agua se realiza en pozos.

3.3.2.3 Filtros de Malla

Constan de una carcasa en cuyo interior se encuentran los elementos filtrantes, que son varios cilindros concéntricos de malla. El entramado de la malla puede ser de acero inoxidable, nylon o poliéster. No se recomienda utilizarlos en aguas muy sucias o que contengan algas, puesto que, al ser filtros de retención superficial, necesitan mantenimiento periódicamente en lapsos cortos de tiempo. Se puede seleccionar el calibre de las partículas a retener.

3.3.2.4 Filtros de Anilla o Disco

Reúnen las ventajas de los filtros de arena y los de malla. Poseen un bajo volumen de filtrado que depende del número de ranuras existentes en las anillas, pero tienen gran rendimiento en la separación de sólidos en suspensión gracias al número de capas filtrantes. Se puede seleccionar el calibre de las partículas a retener.

3.3.3 TUBERÍA

Las tuberías comúnmente utilizadas en agricultura son las termoplásticas, esto debido a que su forma es de fácil adaptación con la aplicación de calor y presión, lo que beneficia a realizar una instalación eficiente. Estas tuberías termoplásticas pueden ser de dos tipos.

- Tubos de PVC: PVC-U (policloruro de vinilo no plastificado) y PVC-O (policloruro de vinilo orientado).
- Tubos de PE (polietileno)

Los tubos de PVC-U se pueden observar en la ilustración 5, estos son indicados para el transporte de agua potable, mientras que los PVC-O son indicados para agua reutilizado. Ambos ofrecen mayor resistencia, capacidad hidráulica y flexibilidad.



Ilustración 5. Tubo de PVC-U

Fuente: (Prakor, 2020)

Por otro lado, los tubos de PE como se observan en la ilustración 6, tienen gran flexibilidad, durabilidad, ofrecen resistencia a la corrosión y a la mayoría de agentes químicos.



Ilustración 6. Tubos de PE

Fuente: (Prakor, 2020)

3.3.4 MANGUERA Y GOTERO

El material utilizado para la fabricación de las mangueras para riego agrícola es el polietileno, ya que es de alta resistencia, fácil de instalar y es versátil para cualquier sistema de riego; son capaces de acoplarse a aspersores, goteros y nebulizadores. Existen diferentes tipos de mangueras según la presión que manejan.

Tabla 2. Tipos de Mangueras según la presión

Tipo de Manguera	Descripción	Rango de presiones
Muy alta presión	Son denominadas mangueras de presión industrial, son altamente flexibles y se aplican a cultivos de alto impacto.	5000 a 6000 psi.
Alta presión	Se utilizan en distribución de agua en cultivos extensos, poseen refuerzos de acero que soportan las tensiones.	1825 a 6000 psi.

Mediana presión	Pueden ser incorporadas en sistemas de riego subterráneos y en instalaciones superficiales, se recomiendan para agua, aceite y aceites minerales.	300 a 1825 psi.
Baja presión	Son más aptas para sistemas de riego por goteo y microaspersión por las presiones que manejan.	Hasta 300 psi.

Fuente: Elaborado por el autor

Por otro lado, los goteros son emisores de riego que se utilizan para el riego de los cultivos, destacan por el ahorro de agua y la precisión en la dosis de riego. Los goteros tienen una serie de laberintos internos que permiten dosificar la cantidad precisa de agua que debe penetrar en las raíces de las plantas. Existen tres tipos de goteros para riego, que son:

- Goteros turbulentos: suelen ser los más utilizados en agricultura, se encuentran dentro de la tubería formando parte de ella. Solo se utilizan en zonas llanas.
- Goteros autocompensantes: se caracterizan por tener un caudal constante incluso cuando en el terreno hay grandes desniveles, pueden ser de botón o insertados.
- Goteros autocompensantes y antidrenantes: se usan masivamente en cultivos hidropónicos, estos se abren cuando en la tubería se alcanza una determinada presión, y cuando esta baja se cierran dando por terminado el ciclo de riego.

3.4 SISTEMA DE FERTIRRIEGO

El fertirriego es una técnica que permite aprovechar el sistema de riego para aplicar los fertilizantes disueltos en el agua. El equipo de fertirriego puede ser utilizado para la quimigación; inyección de herbicidas, fungicidas e insecticidas. Los equipos de fertirriego se pueden desarrollar mediante la programación de inyectoras, o mediante venturis sin programación.

Presenta ciertas limitaciones, pues si aplicamos abono o distintos fertilizantes que no son compatibles, se corre el riesgo de causar obstrucción en la salida de los goteros. Por lo que hay que tomar en consideración que los fertilizantes a incorporar posean alta solubilidad (>100 g/L), alta pureza (>95%), baja salinidad y toxicidad.

3.5 COMPONENTES PRINCIPALES DE SISTEMA DE FERTIRRIEGO

Un sistema de fertirriego como tal, se compone de los siguientes dos elementos.

3.5.1 TANQUE

Son depósitos abiertos o cerrados, fabricados a base de metales o de fibras donde se almacena la solución fertilizante y los químicos que pueden ser aplicados a las plantas. En esta área, los tanques de almacenamiento "Rotoplas" se destacan por su alta calidad, están hechos de polietileno lo que los hace ligeros, flexibles y robustos.

Los tanques "Rotoplas" brindan una gama de equipos agroindustriales, ideales para el almacenamiento de agua, insumos alimenticios, agroquímicos, fertilizantes y mucho más. Existen de diferentes capacidades, desde 450 litros hasta 25,000 litros. En la ilustración 7 podemos observar un tanque Rotoplas ideal para la aplicación necesaria, con una capacidad de 2500 litros.



Ilustración 7. Tanque Rotoplas 2500L

Fuente: (Rotoplas, 2022)

3.5.2 BOMBA DE INYECCIÓN

Es un dispositivo capaz de elevar la presión de un fluido. Dicha bomba puede ser inyectora de pistón o membrana, puede ser una bomba hidráulica o estar accionada por un motor eléctrico o de combustión. Esta bomba inyecta la solución a una presión superior a la de la red de riego.

En el caso de sistemas de riego y presurización de equipos de ósmosis inversa, la categoría de bomba utilizada para la inyección de fluido a presión es la Bomba Booster. Una Bomba Booster es una bomba centrífuga multietapas de posición vertical, estas destacan por la profunda ingeniería hidráulica y mecánica aplicada al diseño, trabajan con amplios rangos de temperaturas, presiones y caudales. En la ilustración 8 se observa cómo se ven de manera general las Bombas Booster.



Ilustración 8. Bombas Booster

Fuente: (EATHISA, 2018)

3.6 CONTROL AUTOMATIZADO DEL SISTEMA

3.6.1 CONTROLADOR LÓGICO PROGRAMABLE (PLC)

Antes del PLC, la lógica cableada era implementada para la automatización de procesos, utilizando contadores, temporizadores, memorias, etc. esto obstaculizaba la eficiencia de los procesos, puesto que las configuraciones se realizaban a criterio propio de la persona encargada, como ellos creían que era lo correcto.

“Un automatismo es un sistema que realiza una tarea de manera automática según los parámetros que fueron establecidos. Con mayor velocidad y calidad a la hora de ejecutar las tareas, se mejora la eficiencia del proceso” (Daneri, 2009).

De esta manera, se pueden disminuir incluso riesgos en las tareas que anteriormente se realizaban de forma manual.

Un Programmable Logic Controller – Controlador Lógico Programable, es un equipo electrónico, programable por el usuario en lenguaje no informático, y que está destinado a gobernar dentro de un entorno industrial, máquinas o procesos lógicos y/o secuenciales. Consta de un hardware estándar, con capacidad de conexión a sensores y actuadores industriales para que desempeñen determinada función al ser programados. El PLC lee el estado de sus entradas, con dicha información ejecuta el programa de control y finalmente se transfieren las señales a las salidas físicas, y el ciclo se repite. Se puede programar en distintos lenguajes, tales como, escalera, bloques de función, lista de instrucciones o texto estructurado. (Daneri, 2009)

Un PLC tiene diversas partes, módulos de entradas y salidas, la unidad de procesamiento central, la fuente de alimentación, la unidad de programación y el módulo de memorias. Los módulos de entrada adaptan las señales recibidas a código que la unidad de procesamiento central pueda interpretar, para ejecutar el programa y dar órdenes de a los módulos de salida. En la ilustración 9 se muestra la estructura de un controlador lógico programable.

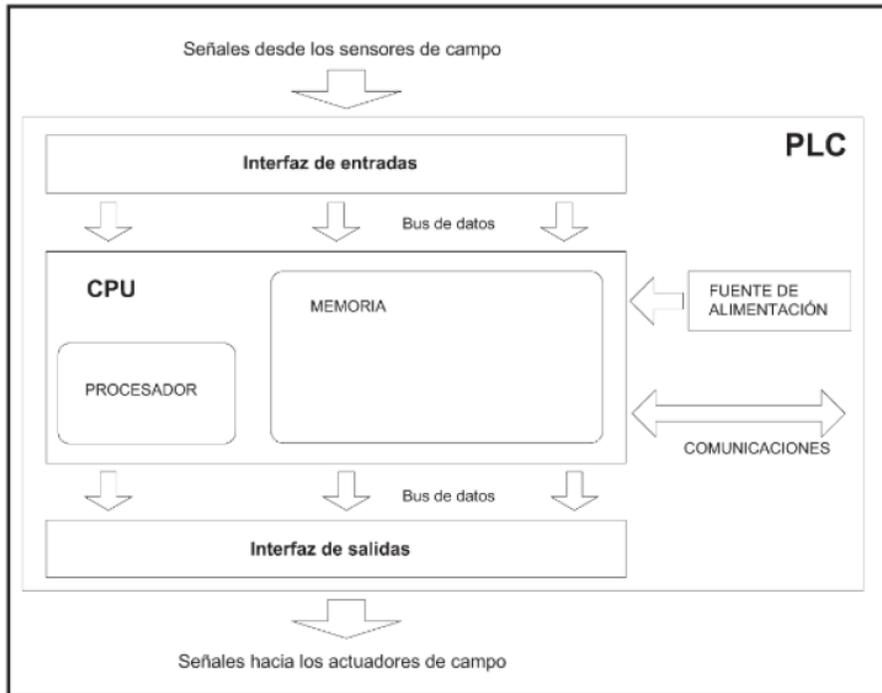


Ilustración 9. Estructura interna de un PLC

Fuente: (Daneri, 2009)

3.6.2 PROGRAMACIÓN EN PLC

El lenguaje escalera, emplea un formato de programación gráfico compuesto por contactos normalmente abiertos y normalmente cerrados, bobinas y cuadros de funciones especiales. En la ilustración 10 se muestra un claro ejemplo de la programación en lenguaje escalera, en la entrada I0.0 se conectó el sensor S1, en la entrada I0.1 se conectó el sensor S2 y en la salida Q9.9 se conectó una bobina del contactor K1.

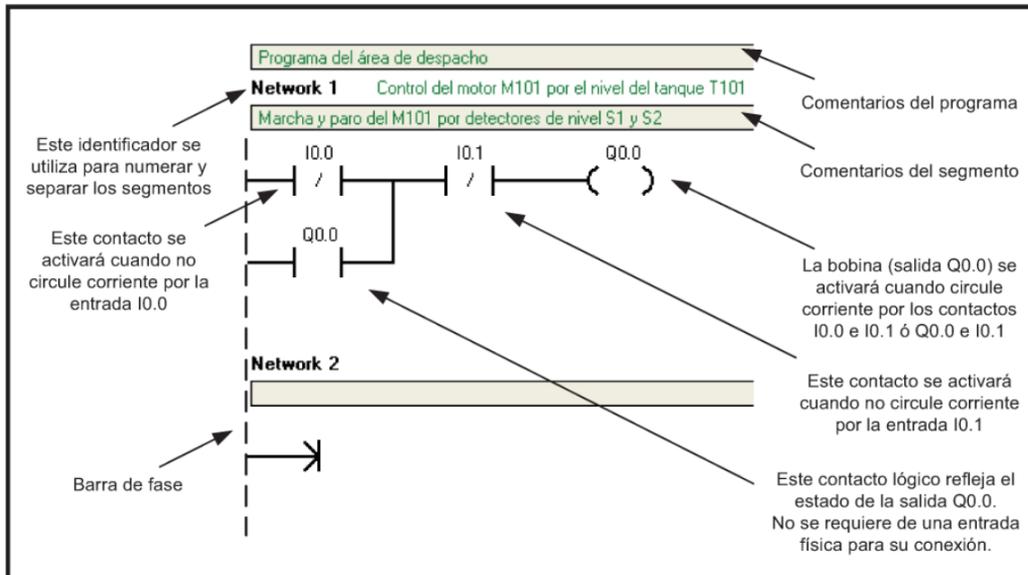


Ilustración 10. Programa en lenguaje escalera

Fuente: (Daneri, 2009)

El lenguaje bloques de función, es un lenguaje gráfico que describe la función entre variables de entrada y salida en un conjunto de bloques. Está basado en el álgebra booleana y el uso de compuertas lógicas, por lo que resulta ser sencillo para los que están relacionados con estas. En la ilustración 11 podemos observar un ejemplo sencillo de este tipo de lenguaje.

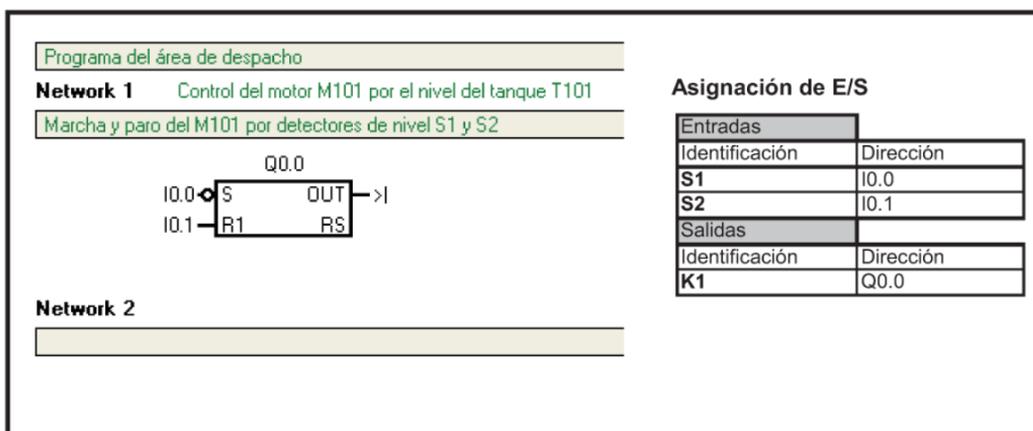


Ilustración 11. Programación en bloques de función

Fuente: (Daneri, 2009)

El lenguaje lista de instrucciones, es similar al lenguaje ensamblador usado en microcontroladores, consiste en una lista de instrucciones en la que cada línea de programa contiene una operación utilizando una abreviatura nemotécnica para representar cada función. Es un lenguaje complicado ya que es necesario conocer la biblioteca del entorno del PLC. En la ilustración 9 podemos observar el mismo programa de la ilustración 12, pero configurado en lista de instrucciones.

Programa del área de despacho		Asignación de E/S	
Network 1 Control del motor M101 por el nivel del tanque T101			
Marcha y paro del M101 por detectores de nivel S1 y S2			
LDN	I0.0	Entradas	
LD	I0.1	Identificación	Dirección
NOT		S1	I0.0
LPS		S2	I0.1
A	Q0.0	Salidas	
=	Q0.0	Identificación	Dirección
LPP		K1	Q0.0
ALD			
O	Q0.0		
=	Q0.0		
Network 2			

Ilustración 12. Programa en lista de instrucciones

Fuente: (Daneri, 2009)

3.6.3 SENSORES INDUSTRIALES

“Los sensores o transductores son dispositivos que transforman una cantidad física de entrada en otra de salida equivalente” (Daneri, 2009, p. 48).

Un transductor es un dispositivo capaz de transformar una magnitud física en otro tipo de magnitud, y un sensor es un transductor utilizado para medir una variable física de interés. Estos conceptos suelen ser confundidos, pero lo que es importante saber, es que un transductor contiene un sensor y un circuito de acondicionamiento de la señal detectada para ajustarla a las necesidades de las entradas del PLC. Estos transductores pueden ser pasivos o activos.

En un transductor pasivo, la acción de la magnitud física a medir provoca un cambio en un elemento pasivo del circuito eléctrico interno, ya sean resistencias, inductancias o capacitancias,

y aparte se necesita una fuente eléctrica externa para excitar el circuito. En cambio, cuando un transductor es activo, genera por sí solo una tensión de salida. (Daneri, 2009, p. 50)

Dependiendo de la forma en la que los transductores codifican la magnitud medida los podemos tener de tres tipos, analógicos, digitales y todo-nada.

- Transductores analógicos: estos brindan como salida un valor de tensión o de corriente en función de la magnitud física medida. Las señales de salida pueden ser de 0 a 10 V, o de 4 a 20 mA, siendo más común la de corriente.
- Transductores digitales: dan como salida una señal en forma de pulsos o codificada en código binario, GRAY, BCD u otro sistema de codificación.
- Transductores todo-nada: estos a diferencia de los dos anteriores, detectan un cambio de estado únicamente cuando la variable a medir supera un umbral. Generalmente son utilizados como detectores de proximidad, presostatos, flujostatos, etc.

3.6.3.1 Sensores de humedad

“La humedad es un fenómeno natural, que se presenta a nivel molecular y se encuentra básicamente relacionada con la cantidad de moléculas de agua presentes en una determinada sustancia, la cual puede estar en estado sólido o gaseoso” (Glaría, 2011).

La humedad es una propiedad que describe la cantidad de agua, vapor de agua o cualquier otro líquido que se encuentre presente en un cuerpo o en el aire. Se considera un parámetro necesario a medir ya que puede influir en procesos físicos o químicos que se estén ejecutando en el ambiente. Existen diferentes tipos de sensores basados en sus principios de funcionamiento, se detallan en la tabla 3.

Tabla 3. Tipos de sensores de humedad

Tipo de sensor	Funcionamiento
Mecánico	Se aprovecha de los cambios físicos que sufren distintos materiales en presencia de humedad. Con la deformación de estos materiales se amplifica la señal y se

	gradúa en proporción a la humedad medida.
Bulbos húmedo y seco	Se basa en la medición de temperatura, a partir de esta deduce la cantidad de agua evaporada presente en una mezcla gaseosa.
Por condensación	Se mide la temperatura de punto de rocío. Por medio de un lazo cerrado de control se tempera la superficie de un espejo hasta llegar al punto de rocío, se mide la temperatura superficial y luego se utilizan ecuaciones para encontrar el grado de humedad.
Sales higroscópicas	Se utiliza una sal higroscópica con afinidad a la absorción de agua, cuando la sal se vuelve cristalina hay poca humedad, cuando se vuelve líquida hay mucha humedad.
Electrolíticos	Se produce la electrólisis de las moléculas de agua presentes en el gas y así se mide la corriente que se genera cuando esto ocurre. No se puede utilizar en cualquier aplicación ya que si hay gases que reaccionen con el pentóxido de fósforo se alteraría la medición.
Por conductividad	Se registra la corriente generada en una superficie, si hay corriente significa que hay presencia de agua, por lo que se aprovecha la medición por conductividad

	a través de una rejilla metálica conectada al medidor.
Piezoeléctricos	Se compara la humedad absoluta presente con la cantidad de agua sobre un cristal cubierto con material higroscópico.

Fuente: Elaborado por el autor.

3.6.4 ACTUADORES INDUSTRIALES

“Los actuadores o accionamientos son los encargados de realizar un trabajo y producir cambios energéticos en el proceso” (Daneri, 2009, p. 48).

Los actuadores son dispositivos capaces de transformar energía eléctrica, neumática e hidráulica en la activación de un proceso para causar un efecto en un proceso automatizado. Existen tres principales tipos de actuadores, hidráulicos, eléctricos y neumáticos, cada uno se aplica en diferentes ocasiones dependiendo del trabajo que va a ejecutar, en la tabla 4 se presenta una breve descripción de cada tipo de actuador.

Tabla 4. Tipos de Actuadores

Actuadores	Descripción
Neumáticos	Están encargados de transformar la energía del aire comprimido en energía mecánica, este aire genera una fuerza en sentido de la expansión del espacio disponible entre las paredes y cuerpo. La energía mecánica puede ser en forma de movimiento rotativo o lineal.
Hidráulicos	Son capaces de transformar energía hidráulica en energía mecánica. La energía hidráulica es suministrada por agua o cualquier otro fluido, se genera fuerza y movimiento.

Eléctricos	Son dispositivos que convierten el movimiento rotatorio de un motor en un movimiento lineal, para levantar, posicionar o hacer girar una carga.
------------	---

Fuente: Elaborado por el autor.

3.6.4.1 Electroválvulas

Una electroválvula es un dispositivo que está diseñado para controlar el flujo de un fluido a través de una tubería. Estas tienen dos partes fundamentales: el solenoide y la válvula. El solenoide convierte la energía eléctrica en mecánica para actuar la válvula, en la ilustración 13 podemos observar un esquema de los componentes principales de una electroválvula.

“Las electroválvulas permiten el acondicionamiento por la aplicación de una diferencia de potencial sobre un solenoide. Este tipo de válvulas es el que se emplea para el control mediante PLC” (Daneri, 2009, p. 84).

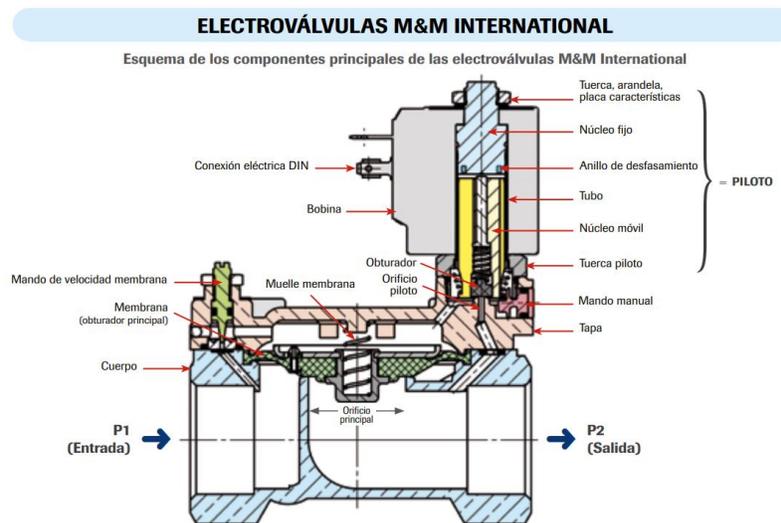


Ilustración 13. Componentes de una Electroválvula

Fuente: (M&M international, 2012)

Las electroválvulas son fáciles de controlar mediante programas de automatización industrial y son utilizadas para manejar agua, aceites, gases, etc. Podemos distinguir tres tipos de electroválvulas, sencillas, asistidas y de tres vías, veremos el detalle en la tabla 5.

Tabla 5. Tipos de Electroválvulas

Electroválvulas	Funcionamiento
Sencillas	Son de tipo directo, pueden ser normalmente abiertas o normalmente cerradas, lo que describe su funcionamiento cuando falla la alimentación eléctrica, quedan abiertas, o bien, cerradas. El solenoide debe estar activado y consumiendo energía para permanecer cerradas o abiertas, según el tipo.
Asistidas	El solenoide no controla directamente la válvula, sino una válvula piloto secundaria, entonces la energía para la actuación de la válvula es proporcionada por la presión del fluido en acción.
De tres vías	Son capaces de conmutar la entrada entre dos salidas, por ello se les llaman de tres vías.

Fuente: Elaborado por el autor.

3.6.5 ESTACIÓN METEOROLÓGICA

Una estación meteorológica es un dispositivo que realiza diferentes mediciones y observaciones sobre los parámetros meteorológicos mediante el uso de múltiple instrumentación adecuada para establecer el comportamiento atmosférico, en la ilustración 14 podemos observar cómo se ve comúnmente una estación meteorológica. Existen diferentes tipos de estaciones meteorológicas según el fin para el cual serán utilizadas, mencionaremos algunas de ellas a continuación:

- Pluviométrica: cuenta con un pluviómetro o recipiente que le permite medir la cantidad de lluvia precipitada.
- Pluviográfica: permite realizar de forma continua un registro de precipitaciones, por lo que nos permite obtener datos de intensidad, cantidad de lluvia, duración, etc.
- Climatológica principal: está provista para realizar registro del tiempo atmosférico, visibilidad, precipitaciones, temperatura, humedad, evaporación y otros fenómenos.

- Climatológica ordinaria: cuenta con un psicrómetro, un pluviómetro y un pluviógrafo, para realizar medición de las precipitaciones y la temperatura de manera instantánea.
- Agrometeorológica: está equipada como una estación climatológica principal, y aparte considera registros de evapotranspiración, temperatura cerca del suelo y a distintas profundidades del mismo.



Ilustración 14. Estación Meteorológica

Fuente: (MAHER, 2020)

3.6.6 MÓDULO DE RADIOFRECUENCIA

Los módulos de radiofrecuencia permiten superar muchos retos de la infraestructura de comunicación de forma fácil y eficiente, son de fácil instalación y sirven para transmitir datos y señales de nuestros sensores al PLC, se suelen ver como en la ilustración 15. Estos módulos de comunicaciones permiten al PLC comunicarse mediante distintos tipos de protocolos, algunos de estos pueden ser los siguientes:

- Protocolo Modbus RTU: se basa en la arquitectura maestro/esclavo o cliente/servidor, permite el intercambio de datos entre los PLC's y los ordenadores. Se puede recibir y proporcionar información a través de conexiones en serie.
- Protocolo Modbus TCP: los bloques de datos de solicitud y respuesta se engloban en un bloque TCP transmitido a través de redes de Ethernet, puede haber múltiples maestros y

múltiples esclavos en la red ya que el medio principal de direccionamiento es mediante la dirección IP. Se utiliza en sistemas SCADA, sensores y actuadores.

- Protocolo Profibus: es un estándar de red digital de campo abierta que distribuye la comunicación entre los sensores de campo y el sistema de control o los controladores. Es una tecnología estable y es adecuado para tareas de comunicación complejas. La transmisión de datos se realiza en ciclos, y los parámetros que no son tan importantes de manera cíclica.
- Protocolo Ethernet/IP: es capaz de manejar grandes cantidades de datos hasta de 1500 bytes por paquete, utiliza un protocolo abierto en la capa de aplicación. Es utilizado en aplicaciones de control ya que es fácil de operar, configurar y ampliar.



Ilustración 15. Módulo radio RAD-2400-IFS

Fuente: (Phoenix Contact, 2022)

3.6.7 PANELES FOTOVOLTAICOS

“La función principal de un panel solar es captar la energía radiante solar y transformarla en energía eléctrica” (Tobajas Vázquez, 2014, p. 54).

Los paneles solares están formados por celdas solares hechas de materiales semiconductores capaces de transformar los fotones en electrones. La luz solar separa los electrones de modo que se forma una capa de carga positiva y otra de carga negativa en la célula solar, y esta diferencia de potencial es lo que genera la corriente eléctrica.

Tabla 6. Tipos de Paneles Fotovoltaicos

Panel Solar	Descripción	Imagen
Monocristalino de Silicio	Son elaborados con el silicio más puro, funcionan en condiciones con poca luz ya que gracias al silicio pueden captar mejor la energía solar. Poseen mucha vida útil, son más potentes y eficientes (de 16 a 22.7%, según el tipo).	 <p>Fuente: (AutoSolar, 2022)</p>
Policristalino de silicio	Tienen componentes de silicio, pero no tan puro como el de los paneles monocristalinos. No se desperdicia tanto silicio al elaborarlos, pero no son tan eficientes (de 15 a 19%, según el tipo).	 <p>Fuente: (AutoSolar, 2022)</p>
Capa Fina (Amorfos)	Proporcionan un rendimiento inferior al 10%, su ventaja es la maleabilidad, también son de silicio. Se suelen instalar en tejados y superficies de edificios. Son delgados, económicos y rentables.	 <p>Fuente: (Tesla Energy, 2021)</p>

Fuente: Elaborado por el autor.

3.6.8 CONEXIONES DE CONTROL Y POTENCIA

Las conexiones de control y potencia son representadas a través de diagramas de control y potencia, son fundamentales en los sistemas automatizados ya que controlan el consumo de energía de los dispositivos eléctricos o neumáticos del sistema. Estos diagramas se presentan de manera separada, ya que tienen funciones diferentes.

3.6.8.1 Conexión de Control

En los sistemas automatizados, los sistemas de control se encargan de tomar decisiones según las señales de entrada del sistema. Se manejan regularmente bajas tensiones, pero se puede llegar a voltajes de 230 VAC. En la ilustración 16 podemos observar un circuito de control empleado mediante lógica cableada.

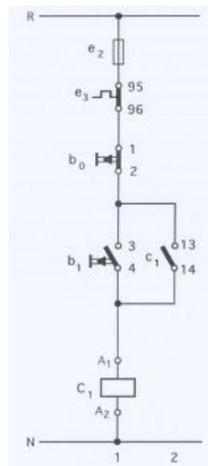


Ilustración 16. Circuito de control

Fuente: (Universidad Nacional de la Plata, 2015)

3.6.8.2 Conexión de Potencia

En un circuito de potencia se manejan altos niveles de corrientes y voltajes, regularmente estos circuitos están directamente asociados a la carga final del circuito, son los encargados de realizar el trabajo indicado por los circuitos de control y representan las conexiones de motores, variadores de frecuencia, bombas y otros actuadores industriales. En la ilustración 17 tenemos la conexión de potencia de un motor eléctrico trifásico.

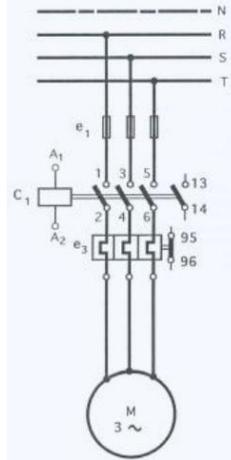


Ilustración 17. Circuito de potencia

Fuente: (Universidad Nacional de la Plata, 2015)

3.6.8.3 Tipos de Cableado

Los conductores eléctricos son materiales que permiten el paso de la corriente eléctrica, se utilizan para transmitir la energía eléctrica a dispositivos finales. La mayoría de estos están conformados por cobre, ya que es un metal con buena conducción y su precio no es tan elevado. Se pueden encontrar diferentes tipos de conductores eléctricos según la tensión a la que se trabaja, en este caso explicaremos únicamente los de baja tensión, pues son los implementados en control y potencia.

Los cables para potencia transportan señales para monitorear y controlar un dispositivo, son cables flexibles y apantallados para la transmisión de datos en entornos con elevado nivel de interferencias, mientras que los cables para control transportan señales eléctricas entregadas por sensores o transductores hasta el dispositivo controlador, se precisa que sean extremadamente flexibles.

El conductor puede estar formado por un solo hilo o por varios dependiendo del grado de flexibilidad que se requiera. En los cables para instrumentación y control el conductor es fabricado en cableado clase B (7 hilos), porque su flexibilidad es apropiada en la mayoría de las aplicaciones. (Centalsa, 2010)

El apantallamiento en los cables para instrumentación y control tiene como objetivo bloquear la interferencia inducida por los campos eléctricos del entorno que pueden alterar la señal original. Para seleccionar apantallamiento correcto se debe tomar en cuenta el tipo de señal a transmitir, la proximidad con fuentes de ruido, las frecuencias y la flexibilidad requerida. Otro factor importante es el aislamiento, este se divide en dos grandes grupos, los termoestables y los termoplásticos.

Tabla 7. Tipos de aislamiento para conductores eléctricos

Aislamientos Termoestables	Aislamientos Termoplásticos
EPR Etileno Propileno	PVC Cloruro de vinilo
XLPE Polietileno Reticulado	Z1 Poliolefinas
EVA Acetato de Etil Vinil	PE Polietileno lineal
SI Silicona	PU Poliuretano
PCP Neopreno	
SBR Caucho Natural	

Fuente: Elaborado por el autor

Otros tipos de aislante son TW, RHW, THW, y THHN, la diferencia entre estos es la temperatura que soportan, en Honduras el más común es THHN. Existen diferentes normativas de diseño para los cables, como ser: IEC 60502, UNE 21123 y UNE 21150. En la tabla 8 se muestra la especificación de conductores según el estándar de clasificación estadounidense AWG, basado en el calibre del cable y la intensidad de corriente permitida.

Tabla 8. Amperaje soportado por cables de cobre

Tipo de aislante	TW	RHW, THW, THWN	THHN, XHHW-2
Calibre	Amperaje soportado (A)		
14	15	15	15
12	20	20	20

10	30	30	30
8	40	50	55
6	55	65	75
4	70	85	95
3	85	100	115
2	95	115	130
1	110	130	145
1/0	125	150	170
2/0	145	175	195
3/0	165	200	225
4/0	195	230	260

Fuente: Elaborado por el autor.

3.6.9 INTERFAZ MÁQUINA HUMANO (HMI)

“El HMI (Human Machine Interface) es un sistema de control industrial. Se trata de la principal herramienta que utilizan los trabajadores de línea para coordinar y controlar la correcta ejecución de los distintos procesos industriales y de fabricación” (Edimar, 2020).

Un sistema HMI es un monitor visual capaz de mostrar información en tiempo real sobre los procesos ligados al sistema que se están ejecutando. Estos sistemas buscan tener conectado al operador con las máquinas industriales que se manejan, permitiendo una visualización gráfica del estado de estas, pueden ser monitores táctiles para operar y supervisar los procesos, o únicamente accionadores e indicadores luminosos. La comunicación entre las HMI's y el controlador lógico programable se establece a través de una conexión en red ethernet, serial RS232S, Modbus, etc.

IV. METODOLOGÍA

4.1 ENFOQUE

El proyecto consiste en el desarrollo de un diseño de sistema automatizado fertirriego por goteo, para monitorear y controlar los parámetros que toman parte en el ecosistema de riego de la caña de azúcar en el territorio hondureño. Está basado en un enfoque cualitativo, se considera la situación de emergencia por la escasez de agua en el país, las ventajas de automatizar los sistemas de riego, su impacto y los elementos e instrumentos más adecuados que garantizan el diseño de un sistema eficiente.

4.2 VARIABLES DE INVESTIGACIÓN

- Parámetros medidos en el ambiente

El sistema automatizado recibe los parámetros de temperatura y humedad del ambiente mediante la estación total, que a su vez realiza el cálculo de evapotranspiración del cultivo, que funciona dentro del programa de control para calcular la lámina de riego adecuada según las condiciones ambientales.

- Parámetros medidos en el suelo

Tanto los parámetros medidos en el ambiente como el parámetro de humedad medido en el suelo son variables críticas que se deben contemplar para definir la lámina de riego adecuada para el cultivo. La combinación de ambos propicia al efectivo riego y aprovechamiento de agua en el cultivo.

- Selección de tuberías y bomba

Los sistemas de riego en general precisan de una adecuada selección de tuberías ya que se debe tener una velocidad que permita el flujo correcto del agua y otros químicos aplicados. Para determinar los diámetros se debe realizar el cálculo de flujo partiendo desde los goteros y la cantidad de goteros, así teniendo un flujo total determinar las tuberías por secciones y el tamaño de la bomba.

- Sensores

Una vez determinados los parámetros a medir en el suelo de cultivo, fue necesario determinar los sensores adecuados para la toma de datos según el tipo de suelo y la profundidad en la que serían instalados, esto para garantizar una correcta recopilación de datos para su análisis.

- Protocolo de comunicación

Se estableció el protocolo de comunicación entre el controlador maestro y los módulos de expansión y de radiofrecuencia para una correcta transferencia de los datos a analizar.

- Diseño eléctrico y alimentación

El diseño eléctrico se definió con la ayuda de los manuales técnicos de los sensores y los actuadores seleccionados, determinando el tipo de cableado adecuado y alimentación sugerida según el caso.

4.3 TÉCNICAS E INSTRUMENTOS APLICADOS

Estación Meteorológica: este instrumento permite tener un control de datos de las variables ambientales y agronómicas que influyen de manera directa e indirecta en el desarrollo de los cultivos. Dentro de estas variables se encuentra la temperatura, humedad, presión, velocidad y dirección del viento, horas de sol, etc.

Solidworks: es un software de diseño asistido por computadora para modelar piezas y ensamblajes en planos de dos y tres dimensiones. Además, permite realizar análisis estáticos, dinámicos y termodinámicos. Para su uso se requieren conocimientos en dibujo técnico.

CoDeSys: es un software de programación diseñado para tecnologías de programación industrial conforme al estándar industrial internacional IEC 61131-3, posee simulador para la revisión de la programación y HMI intergada. Cientos de marcas de PLC's se programan en esta herramienta y para su uso se requieren conocimientos en programación de autómatas.

AutoCAD: es un software de diseño asistido por computadora, utilizado para diseño de planos de estructuras y eléctricos, tanto en dos como en tres dimensiones. Permite generar documentos

inteligentes de los modelos realizados. Para su uso es necesario tener conocimientos de dibujo técnico.

Entrevista a expertos: es un instrumento utilizado en la investigación cualitativa, este consiste en realizar una serie de preguntas a uno o varios expertos en un tema en específico, con el fin de recopilar información valiosa y en la que se debe profundizar.

4.4 MATERIALES

Gabinete PLC:

- Armario: carcasa universal SRN6625K ABB de acero galvanizado de 600x600x250mm.
- Fuente de alimentación: SD822X, entrada de 115/260 V a.c. 225-250 V d.c., salida de 24 V d.c., 5 A y 120 W.
- PLC: PM564 TP-ETH controlador lógico programable, 128Kb, 6DI/6DO 2AI/1AO, 24VDC.
- HMI CP607: Panel de control de 7" TFT touch screen, 64 K colors, 800x480 pixel, RAM 256MB.
- Módulo de radiofrecuencia: Phoenix Contact 2400-IFS, 2400MHz, interfaz RS-232/485, ampliable con módulos de E/S.
- Módulo de DO: DO561 ABB, 8DO-Transistor: 24VDC/0.5A

Sensores y Actuadores industriales:

- Sensor de humedad: OXT-TR RS485. Fuente de alimentación de 12-24V DC, rango de medición 0-100%, salida analógica de 0-10V y 4-20mA.
- Sensor de presión: IFM rosca G 1/4", rango de 0-10 Bar, 4-20mA, protección IP 69K.
- Bomba centrífuga: Goulds Pump Series 3656 Modelo 20BF 60HP, 4X6-16.
- Bomba de inyección: Goulds Booster Pump Serie 10 SV, 1HP, diámetro de succión y descarga de 2".

Almacenamiento:

- Tanque: almacenamiento de solución fertilizante 2,500L.

Canales de alimentación:

- Tubo de acero de 10" de 5 metros de largo para línea de succión de la bomba.
- Tubo de acero de 8" de 15 metros de largo para línea principal de descarga de la bomba.
- Tubo de acero de 2" de 3 metros de largo para succión de tanque fertirriego
- Tubo PVC sanitario de 4" de 1896 metros de largo para línea secundaria de distribución de agua.
- Tubo PVC sanitario de 2".
- Mangueras de 17mm con emisor de laberinto y separación de 0.4m.
- Codos de radio largo de 90° de 4".
- Tee de flujo en el ramal de 4" para conexión entre tuberías
- Accesorio para contracción de diámetro de 8" a 4"
- Válvula cheque, de compuerta, de mariposa y de alivio para el sistema de tubería.

Otros:

- Filtro de anillos: ARKAL 4" super angle filter fl 120 mesh, para un flujo máximo de $90 \frac{m^3}{h}$.
- Filtro de grava: Yamit 30", para un flujo máximo de $30 \frac{m^3}{h}$.
- Panel Solar: 12V 30W.
- Batería: 12V 9A.

4.5 METODOLOGÍA DE ESTUDIO

4.5.1 ANÁLISIS DEL ENTORNO DE LA PRODUCCIÓN Y AUTOMATIZACIÓN DE RIEGO DE LA CAÑA DE AZÚCAR EN HONDURAS

Como parte del entorno de la producción y la automatización del riego de la caña de azúcar en Honduras, se tomó como referencia el sistema de riego implementado en el Ingenio Azucarero de la Compañía Tres Valles. De esta forma se obtiene el análisis del entorno de automatización

en sistemas de riego de caña de azúcar. Se realizaron entrevistas a ingenieros y técnicos que trabajan en la empresa, en donde se hizo énfasis sobre la problemática que aqueja al entorno del fertirriego y recomendaciones al momento de automatizar un sistema.

Durante la visita técnica llevada a cabo el día 25 de febrero de 2022 en la Finca El Laberinto, se observó el centro de distribución del agua de irrigación para diferentes lotes de siembra de caña de azúcar. Su fuente de agua es el Río Choluteca que cruza por la parte derecha del ingenio, en el sistema hidráulico poseen tubería de hierro negro para las líneas de succión de las bombas y para la línea de descarga principal, el llamado "manifold", y cuatro bombas de succión. Para la aplicación de solución fertilizante se utiliza una Bomba Booster que inyecta el fluido a una presión mayor que la de la línea principal.

En la entrevista con el ingeniero mecatrónico del área de investigación, se mencionó que hace dos años una empresa extranjera realizó el trabajo de automatización de la finca, mismo que ha sido defectuoso y hasta hace unos pocos meses comenzaron a realizar pruebas con el mismo, lo único que posee dicha automatización, es un sistema de control para electroválvulas en los lotes de riego de la finca, mientras que el encendido y apagado de las bombas, el sistema de inyección de fertilizante y las válvulas en todo el manifold son controlados manualmente por los operadores encargados. Los que nos lleva a la aplicación de fertilizante, se utiliza un sistema de inyección operado una vez por mes donde se necesitan más de diez hombres para cargar los tanques de almacenamiento y echar a andar el sistema. Actualmente están realizando pruebas con un nuevo sistema de aplicación de fertilizante llamado "fertikit", que aplica inyecta la solución medida a razón de venturis conectados a la bomba de este pequeño sistema.

En un lote de la finca se pudo observar la estación meteorológica que proporciona los datos de ambiente mediante una API, con esta herramienta los ingenieros encargados de la planeación del riego pueden tomar diversas decisiones en base a los datos obtenidos, sumado a esta tecnología, se hace uso de sensores de humedad enterrados en el suelo para monitorear la saturación de agua a la que está expuesta la planta.

4.5.2 IDENTIFICACIÓN DE TRABAJOS SIMILARES SOBRE RIEGO

El diseño del sistema de riego por goteo automatizado con sistema de fertirriego no es posible sin la adecuada información obtenida de libros, papers, artículos científicos y páginas web. El marco teórico engloba todos los fundamentos y componentes necesarios que deben ser tomados en consideración para automatizar un sistema de riego por goteo y lograr el objetivo principal de este tipo de riego que es, el aprovechamiento del recurso hídrico aplicando únicamente la dosis de agua necesaria para el cultivo con el que se está trabajando. Principalmente se tomó como referencia distintos papers y artículos de la Escuela Agrícola Panamericana (Universidad Zamorano), Universidad Nacional Autónoma de México y páginas de gobierno.

4.5.3 DISEÑO HIDRÁULICO Y SELECCIÓN DE BOMBA

Para realizar el diseño del sistema hidráulico, seleccionar los diámetros de las tuberías de succión, descarga y determinar la bomba, fue necesario determinar el flujo de riego requerido por el sistema, en la tabla 9 se detallan los cálculos de este.

Tabla 9. Resumen de cálculos para determinación del flujo requerido

Requerimientos	
Lámina de riego establecida	5 mm
Área de cultivo	40 ha (400,000 m ²)
Volumen de agua requerido	2,000,000 L (2,000 m ³)
Goterros y Flujo	
Flujo de goteros	1 L/h
Largo cinta de goteo	316 m
Cantidad total de cintas de goteo	843
Separación entre cintas de goteo	1.5 m
Separación entre goteros	0.4 m
No. Goteros por cinta	791
Total de goteros	666,667
Flujo requerido	666,666.67L/h (666.67 m ³ /h)

Flujo requerido por turno	166,666.67L/h (166.67 m ³ /h)
Tiempo de Riego	
Tiempo total	3 hr
Tiempo por turno	45 min

Fuente: Elaborado por el autor

La lámina de riego se determinó con base en las fuentes bibliográficas, el área de cultivo fue establecida por el autor y el volumen de agua requerido se determinó por medio de la ecuación 2.

$$\text{Volumen de agua requerido (m}^3\text{)} = \frac{\text{Lámina de riego (m)}}{\text{Área de cultivo (m}^2\text{)}}$$

Ecuación 2. Volumen de agua requerido

Fuente: (Cevallos Zambrano, 2008)

El flujo de los goteros y la separación entre goteros son datos brindados por el fabricante de estos, el largo de la cinta de goteo y la cantidad de cintas de goteo fueron determinadas por el autor, la separación entre cintas de goteo se determinó con base en las fuentes bibliográficas. El número de goteros por cinta se determinó mediante la siguiente ecuación 3.

$$\text{Total de goteros del sistema} = \frac{\text{Separación entre goteros (m)} * \text{Total de cintas de goteo}}{\text{Largo de cinta de goteo (m)}}$$

Ecuación 3. Total de goteros por cinta

Fuente: (Cevallos Zambrano, 2008)

Con estos datos y la ecuación 4 se logró calcular el flujo total del sistema.

$$\text{Flujo requerido (L/h)} = \text{Flujo de goteros (L/h)} * \text{Total de goteros del sistema}$$

Ecuación 4. Flujo requerido

Fuente: (Cevallos Zambrano, 2008)

Debido a que el flujo requerido es bastante elevado, se seccionó el sistema en 4 partes de 10 ha cada una, esto para irrigar en 4 turnos con un flujo dividido entre 4, lo que nos deja con un flujo total de $166.67 \text{ m}^3/\text{h}$, con este se determinaron los diámetros de la tubería de succión y la tubería principal de descarga con ayuda de la ilustración 18. En dicha ilustración se observa que la línea de succión debe ser de 6 pulgadas y la línea de descarga de 4 pulgadas, ambas de cédula 40, material PVC.

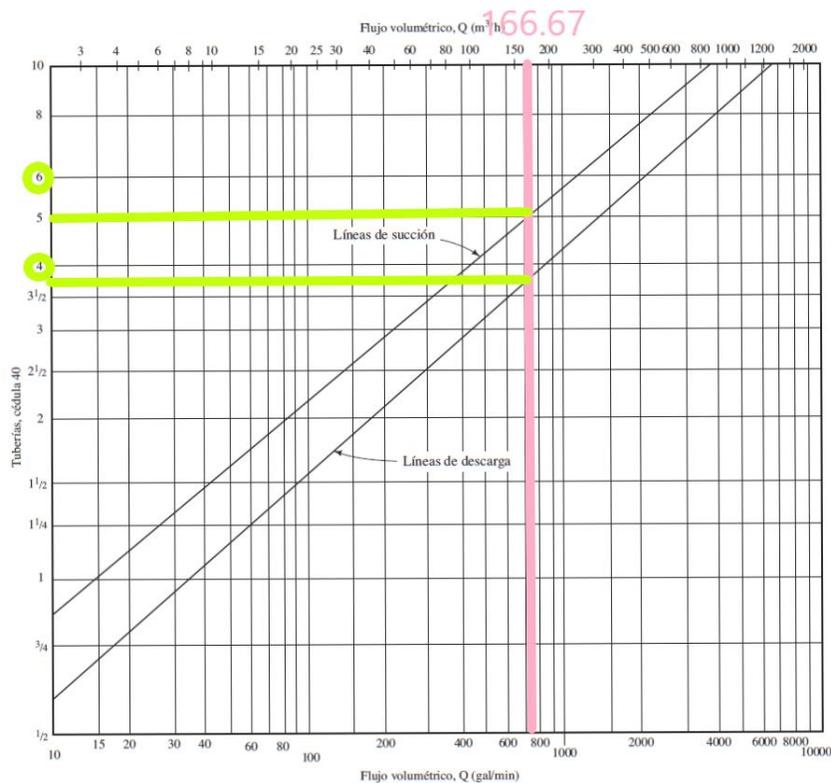


Ilustración 18. Selección diámetro de línea de succión y descarga

Fuente: (Mott, 2006)

4.5.3.1 Cálculo de Potencia de la Bomba Principal

Algunos parámetros importantes de calcular para compensar las pérdidas menores de energía en el sistema son la pérdida total de energía y la carga total de la bomba. Para encontrar ambos parámetros se utiliza la ecuación 5 que es general de la energía.

$$h_a = \frac{p_2 - p_1}{\gamma} + z_2 - z_1 + \frac{v_2^2 - v_1^2}{2g} + h_L$$

Ecuación 5. General de la Energía

Fuente: (Mott, 2006)

Donde:

h_a = carga total de la bomba

p_2 = presión en punto 2

p_1 = presión en punto 1

γ = peso específico

z_2 = altura en punto 2

z_1 = altura en punto 1

v_2 = velocidad en punto 2

v_1 = velocidad en punto 1

g = gravedad

h_L = pérdida total de la bomba

Al seleccionar la bomba principal para el sistema de riego se consideraron los siguientes factores:

1. Condiciones del flujo a bombear
2. Flujo volumétrico
3. Condiciones en la línea de succión
4. Condiciones en la línea de descarga
5. Pérdidas menores del sistema
6. Carga total de la bomba

En la ilustración 19 se muestra el cálculo detallado de las pérdidas menores del sistema diseñado, lo que nos lleva a encontrar la carga total de la bomba y la potencia de la bomba, siendo estas

290.5 m y aproximadamente 240.40 HP, respectivamente, lo que determina los parámetros de la bomba que se utilizará.

Pérdidas menores-Tubería 1:		K	Qty.		
Tubería: $K_1 = f(L/D) =$	0.79	1	Energy loss $h_{L1} =$	0.275 m	Fricción
Pérdida a la entrada: $K_2 =$	1.00	1	Energy loss $h_{L2} =$	0.350 m	
válvula de compuerta abierta: $K_3 =$	1.28	1	Energy loss $h_{L3} =$	0.448 m	
Medidor de presión: $K_4 =$	3.20	1	Energy loss $h_{L4} =$	1.119 m	
Válvula de alivio: $K_5 =$	3.20	1	Energy loss $h_{L5} =$	1.119 m	
Element 6: $K_6 =$	0.30	1	Energy loss $h_{L6} =$	0.105 m	
Element 7: $K_7 =$	0.00	0	Energy loss $h_{L7} =$	0.000 m	
Element 8: $K_8 =$	0.00	0	Energy loss $h_{L8} =$	0.000 m	
Pérdidas menores-Tubería 2:		K	Qty.		
Tubería: $K_1 = f(L/D) =$	75.22	1	Energy loss $h_{L1} =$	128.03 m	Fricción
Válvula check tipo giratorio: $K_2 =$	16.00	1	Energy loss $h_{L2} =$	27.23 m	
válvula de alivio: $K_3 =$	3.20	1	Energy loss $h_{L3} =$	5.45 m	
Válvula de compuerta abierta: $K_4 =$	1.28	1	Energy loss $h_{L4} =$	2.18 m	
tees de flujo: $K_5 =$	9.60	2	Energy loss $h_{L5} =$	32.68 m	
codo de radio largo 90°: $K_6 =$	3.20	4	Energy loss $h_{L6} =$	21.78 m	
Contracción gradual relación 2: $K_7 =$	0.32	1	Energy loss $h_{L7} =$	0.54 m	
Medidor de presión: $K_8 =$	3.20	1	Energy loss $h_{L8} =$	5.45 m	
			Total de energía perdida $h_{Ltot} =$	226.75 m	
			carga de presión =	34.4	
			carga de elevación =	28.0	
			carga de velocidad =	1.4	
Resultados:			Carga total de la bomba: $h_A =$	290.5 m	
			Power added to fluid: $P_A =$	148.90 kW	
			Eficiencia de la bomba =	83.00 %	
			Potencia de la bomba: $P_I =$	179.40 kW	

Ilustración 19. Cálculo de h_a , p_a y p_i

Fuente: Elaborado por el autor

Como se puede observar, con los diámetros de tubería seleccionados la bomba requerida es mayor a 200 HP, lo que incurre en una inversión sumamente alta, es por esto que se decidió cambiar los diámetros de 6" y 4", a 10" y 8" respectivamente. Una vez realizados estos cambios se recalcularon los parámetros de carga total de la bomba y potencia de la bomba requerida, como se observan en la ilustración 20.

Pérdidas menores-Tubería 1:		K	Qty.		
Tubería: $K_1 = f(L/D) =$	0.51	1	Energy loss $h_{L1} =$	0.022	m Fricción
Pérdida a la entrada: $K_2 =$	1.00	1	Energy loss $h_{L2} =$	0.042	m
válvula de compuerta abierta: $K_3 =$	1.28	1	Energy loss $h_{L3} =$	0.054	m
Medidor de presión: $K_4 =$	3.20	1	Energy loss $h_{L4} =$	0.135	m
Válvula de alivio: $K_5 =$	3.20	1	Energy loss $h_{L5} =$	0.135	m
Element 6: $K_6 =$	0.30	1	Energy loss $h_{L6} =$	0.013	m
Element 7: $K_7 =$	0.00	0	Energy loss $h_{L7} =$	0.000	m
Element 8: $K_8 =$	0.00	0	Energy loss $h_{L8} =$	0.000	m
Pérdidas menores-Tubería 2:		K	Qty.		
Tubería: $K_1 = f(L/D) =$	41.75	1	Energy loss $h_{L1} =$	4.38	m Fricción
Válvula check tipo giratorio: $K_2 =$	16.00	1	Energy loss $h_{L2} =$	1.68	m
válvula de alivio: $K_3 =$	3.20	1	Energy loss $h_{L3} =$	0.34	m
Válvula de compuerta abierta: $K_4 =$	1.28	1	Energy loss $h_{L4} =$	0.13	m
tees de flujo: $K_5 =$	9.60	2	Energy loss $h_{L5} =$	2.01	m
codo de radio largo 90°: $K_6 =$	3.20	4	Energy loss $h_{L6} =$	1.34	m
Contracción gradual relación 2: $K_7 =$	0.32	1	Energy loss $h_{L7} =$	0.03	m
Medidor de presión: $K_8 =$	3.20	1	Energy loss $h_{L8} =$	0.34	m
			Total de energía perdida $h_{Ltot} =$	10.66	m
			carga de presión =	34.4	
			carga de elevación =	28.0	
			carga de velocidad =	0.1	
Resultados:			Carga total de la bomba: $h_A =$	73.1	m
			Power added to fluid: $P_A =$	37.49	kW
			Eficiencia de la bomba =	83.00	%
			Potencia de la bomba: $P_I =$	45.16	kW

Ilustración 20. Cálculo de h_a , p_a y p_i con nuevos diámetros

Fuente: Elaborado por el autor

Con los nuevos cálculos, la potencia de la bomba requerida es aproximadamente de 60 HP, asumiendo una eficiencia requerida de de 84% y un flujo volumétrico de $166.67 \text{ m}^3/h$. Partiendo de estos datos se realizó la búsqueda y se determinó que la bomba adecuada para el sistema propuesto es la Goulds pump Serie 3656 Modelo 20BF – 60 Hz, 1750 rpm, encontrada el mercado hondureño, mostrada en la ilustración 21.



Ilustración 21. Goulds Pump 3656 series

Fuente: (Goulds Water Technology, 2021)

La bomba 15AI/BF tiene un diámetro de succión de 6" y un diámetro de descarga de 4", por lo cual será necesario instalar un acople para conectar con la tubería seleccionada previamente. Gracias a la curva de rendimiento de la bomba obtenida del manual de fabricante, trazada por el autor y presentada en la ilustración 22, se detallan las características de la bomba en la tabla 10.

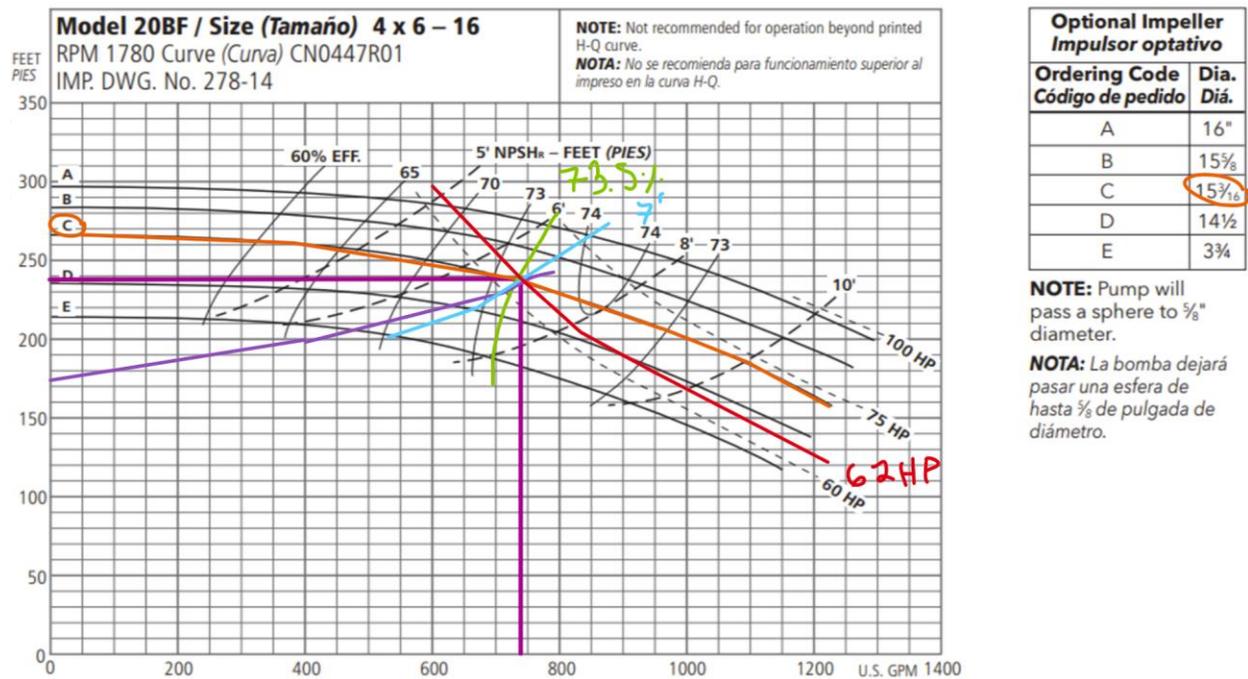


Ilustración 22. Curva de rendimiento Bomba 20BF 4x6-16

Fuente: Elaborado por el autor

Tabla 10. Características de operación Bomba Centrífuga

Punto de operación		Diámetro del impulsor	Potencia	Eficiencia	NSPHr
730gpm (166.67m ³ /h)	239ft (76.9m)	15 3/16"	62HP	73.5%	7ft (22.9m)

Fuente: Elaborado por el autor

4.5.3.1 Bomba Booster para Inyección

Para el sistema de inyección de fertilizante, se realizó la búsqueda de una bomba que suministrara 10 m³/h a una presión mayor que la presión principal de la línea de descarga para poder inyectar el fertilizante en el sistema. Al observar el gráfico del rango de funcionamiento de las Bombas Booster serie SV de la marca Goulds Water Technology en la ilustración 23, nos percatamos que la serie de bombas 10SV es la que cumple con el requerimiento de flujo indicado. Dicha serie de bombas tiene las siguientes características técnicas:

Tabla 11. Características Bombas Booster Serie SV

Rango de operación	Presión máxima	Potencia	Eficiencia
9 – 75gpm	580psi	3/4 – 20HP	70%

Fuente: (Goulds Water Technology, 2013)

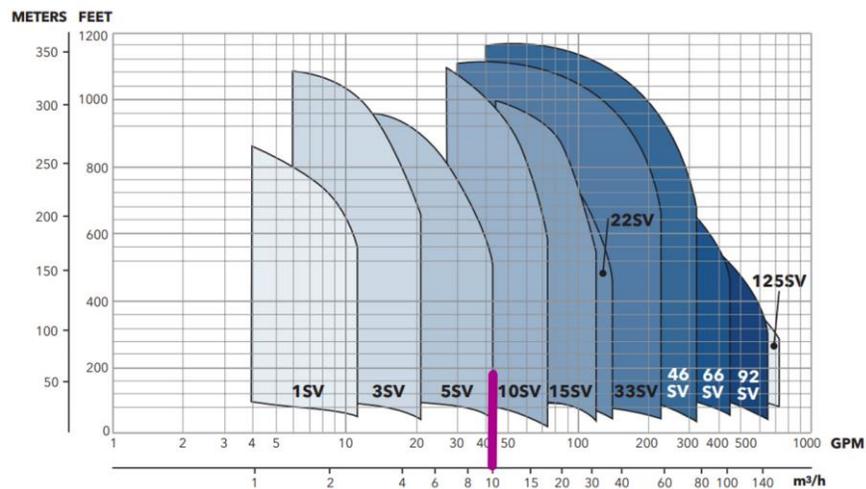


Ilustración 23. Rango de operación de Bomba Goulds Booster Serie SV

Fuente: (Goulds Water Technology, 2013)

4.5.4 SELECCIÓN DE SENSORES Y ACTUADORES INDUSTRIALES

Los sensores seleccionados para la medición de humedad en el suelo deben ser aptos para el tipo de suelo en el que se cultiva la planta. Como indica la bibliografía, las raíces de la caña de azúcar se pueden encontrar hasta 80 cm por debajo de la superficie, sin embargo, está confirmado que la mayor proporción de raíces se presenta en los primeros 40 cm de profundidad, por lo que se decidió colocar dos sensores de humedad, uno entre los 0 y 20 cm, y otro entre los 20 y 40 cm.

La bomba principal del sistema se seleccionó utilizando los parámetros determinados en la sección 4.5.3. Mientras que la bomba de inyección de la solución fertilizante se seleccionó en base a la presión calculada en la tubería, ya que la bomba debe inyectar la solución a una presión mayor a la presión del sistema para que esta pueda ingresar y recorrer las tuberías hasta el destino final.

Las válvulas solenoide seleccionadas para el seccionamiento de los turnos establecidos, deben poder acoplarse a los diámetros de tubería que se encuentran en el sistema.

4.5.5 CONEXIÓN DE SENSORES Y ACTUADORES INDUSTRIALES

Las conexiones entre sensores, actuadores y el controlador lógico programable se realizaron con base en las especificaciones en el manual de los fabricantes de estos y del PLC PM564. El PLC PM564 cuenta con entradas digitales, analógicas, y salidas de tipo transistor.

En el anexo 7 se pueden encontrar dos diagramas eléctricos, el primero es el del PLC PM564 y el segundo es el del módulo de salidas digitales DO561. En el primer diagrama se observa una línea roja que representa la alimentación del PLC, esta se conecta al puerto L+ de entrada de voltaje. Esta misma línea sale por el puerto de L+ de salida de voltaje, se conecta al puerto UP y alimenta a su vez al paro de emergencia y a los transmisores de presión. La línea azul representa el cableado neutro, se conecta a la entrada común del PLC, al puerto ZP y a todas las salidas digitales. En las entradas digitales únicamente se está utilizando la DI0, donde se conecta el paro de emergencia del sistema. En las entradas analógicas se están utilizando los puertos AI0 y AI1 para conectar los dos transmisores de presión que posee el sistema. En las salidas digitales DO0 y DO1 están

conectados los accionamientos de las dos bombas del sistema. En las salidas de DO2 a DO5 se encuentran los comandos de apertura de las electroválvulas para retrolavado.

En el segundo diagrama se muestra la línea roja de alimentación del módulo conectada al puerto UP. También se observa la línea azul que representa el cable neutro del sistema, que se conecta al puerto ZP del módulo y a las salidas digitales. En cuanto a las salidas, estamos utilizando desde la 0 hasta la 4, estas representan los comandos de apertura de las electroválvulas de seccionamiento y de la bomba de fertirriego.

4.5.6 PROGRAMACIÓN DE CONTROL AUTOMATIZADO

La programación del sistema de control se realizó en CODESYS V3.5, ya que es un software adecuado para la programación de controladores industriales. La lógica de la programación se basó en la consigna presentada en el anexo 4, en donde se determinan los eventos que ocurren en el sistema.

Con la consigna determinada, se realizó el levantamiento de señales del sistema indicado en el anexo 5. Cabe destacar que el paro de emergencia se agregó como botón físico por cualquier problema o accidente con el sistema, al utilizar este accionamiento el sistema debe volver a energizarse para que reinicie sus operaciones programadas.

Posteriormente se agregó el dispositivo PLC PM564 al entorno de CODESYS para el direccionamiento de las señales físicas de entrada digitales (únicamente el paro de emergencia por seguridad) y analógicas (dos sensores de presión para la línea de descarga principal) como se observan en la ilustración 24.

Variable	Asignación	Canal	Dirección	Tipo	Unidad	Descripción
Entradas digitales + anal...						
PE		Entradas digitales DI0 - DI5, AI0 - AI1	%IB4000	BYTE		
		Entrada digital DI0	%IX4000.0	BOOL		Paro de emergencia
		Entrada digital DI1	%IX4000.1	BOOL		
		Entrada digital DI2	%IX4000.2	BOOL		
		Entrada digital DI3	%IX4000.3	BOOL		
		Entrada digital DI4	%IX4000.4	BOOL		
		Entrada digital DI5	%IX4000.5	BOOL		
		Entrada digital AI0	%IX4000.6	BOOL		
		Entrada digital AI1	%IX4000.7	BOOL		
		Interrupción DI0 - DI3	%IB4001	BYTE		
TP01		Entrada analógica AI0	%IW2001	INT		Sensor de presión descarga
TP02		Entrada analógica AI1	%IW2002	INT		Sensor de presión después filtros

Ilustración 24. Direccionamiento de entradas digitales y analógicas PLC PM564

Fuente: Elaborado por el autor

De igual forma se especificaron las salidas digitales conectadas al PLC PM564, siendo estas los motores de la Bomba Centrífuga y Bomba Booster, así como las electroválvulas de los filtros para el retrolavado de los mismos, se detallan en la ilustración 25.

Variable	Asignación	Canal	Dirección	Tipo	Unidad	Descripción
Salidas digitales + anal...						
		Entrada digital DI3	%IX4000.3	BOOL		
		Entrada digital DI4	%IX4000.4	BOOL		
		Entrada digital DI5	%IX4000.5	BOOL		
		Entrada digital AI0	%IX4000.6	BOOL		
		Entrada digital AI1	%IX4000.7	BOOL		
		Interrupción DI0 - DI3	%IB4001	BYTE		
TP01		Entrada analógica AI0	%IW2001	INT		Sensor de presión descarga
TP02		Entrada analógica AI1	%IW2002	INT		Sensor de presión después filtros
Salidas digitales DO0 / NO0 - DO5 / NO5						
MB00		Salidas digitales DO0 / NO0	%QB4000	BYTE		
MB01		Salida digital DO0 / NO0	%QX4000.0	BOOL		Motor bomba centrífuga
EV01		Salida digital DO1 / NO1	%QX4000.1	BOOL		Motor bomba booster
EV02		Salida digital DO2 / NO2	%QX4000.2	BOOL		Electroválvula filtro 1
EV03		Salida digital DO3 / NO3	%QX4000.3	BOOL		Electroválvula filtro 2
EV04		Salida digital DO4 / NO4	%QX4000.4	BOOL		Electroválvula filtro 3
		Salida digital DO5 / NO5	%QX4000.5	BOOL		Electroválvula filtro 4
		Salida analógica AO1 / AO0	%QW2001	INT		

Ilustración 25. Direccionamiento salidas digitales PLC PM564

Fuente: Elaborado por el autor

Debido a que el PLC PM564 no cuenta con las salidas digitales suficientes que requiere el sistema diseñado, se agregó un módulo de expansión de salidas digitales, el DO561, que cuenta con 8 salidas. En la ilustración 26 se muestra el direccionamiento de las seis electroválvulas accionadas por el módulo para fertirrigación y seccionamiento de las áreas a irrigar.

Variable	Asignación	Canal	Dirección	Tipo	Unidad	Descripción
EV10		Salidas digitales O0 - O7	%QB0	BYTE		
EV11		Salida digital O0	%QX0.0	BOOL		Electroválvula tanque fertirriego
EV21		Salida digital O1	%QX0.1	BOOL		Electroválvula bomba fertirriego
EV22		Salida digital O2	%QX0.2	BOOL		Electroválvula turno 1
EV23		Salida digital O3	%QX0.3	BOOL		Electroválvula turno 2
EV24		Salida digital O4	%QX0.4	BOOL		Electroválvula turno 3
		Salida digital O5	%QX0.5	BOOL		Electroválvula turno 4
		Salida digital O6	%QX0.6	BOOL		
		Salida digital O7	%QX0.7	BOOL		

Ilustración 26. Direccionamiento salidas digitales Módulo DO561

Fuente: Elaborado por el autor

Una vez realizado el levantamiento de señales y el direccionamiento de las variables físicas en nuestro PLC, comenzó la programación en código CFC. Como se observa en la ilustración 27, el programa empieza con la configuración del arranque, paro y paro de emergencia. Siendo el arranque y paro variables controladas mediante la HMI del sistema, y el paro de emergencia un accionamiento físico en campo.



Ilustración 27. Programación en CFC encendido y apagado del sistema

Fuente: Elaborado por el autor

Como se observa en la ilustración 28, cuando el sistema esté encendido la bomba principal arrancará automáticamente una vez transcurrido el tiempo configurado; esta incluso se puede accionar de manera manual. Después de que la bomba principal haga su trabajo, la bomba de fertirriego se accionará automáticamente durante un tiempo determinado por cada turno de riego, de igual forma, esta bomba se puede accionar de manera manual desde el panel HMI.

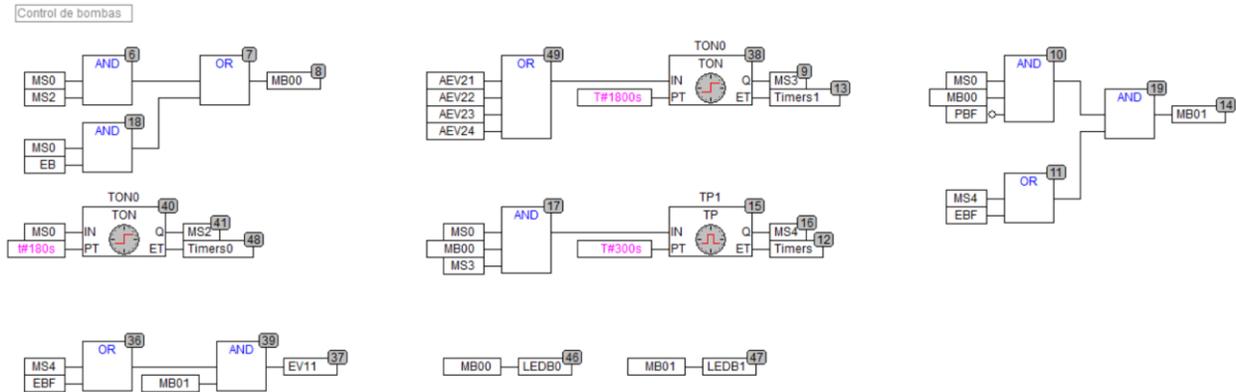


Ilustración 28. Programación en CFC de bombas

Fuente: Elaborado por el autor

Los tanques de filtrado cuentan con una electroválvula para la realización periódica a criterio del operario del retrolavado de los filtros de arena. El control del retrolavado se realiza por medio de los botones de la HMI. En la ilustración 29 se detalla la programación realizada para dichas válvulas.

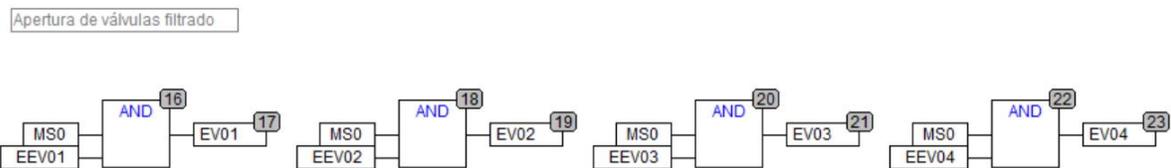


Ilustración 29. Programación en CFC de válvulas de filtrado

Fuente: Elaborado por el autor

En la ilustración 30 se observa la programación de las válvulas de seccionamiento para la irrigación de las plantas. Se configuró para que solo se pueda abrir una válvula a la vez para no sobrecargar la bomba del sistema.

Apertura de válvulas de seccionamiento

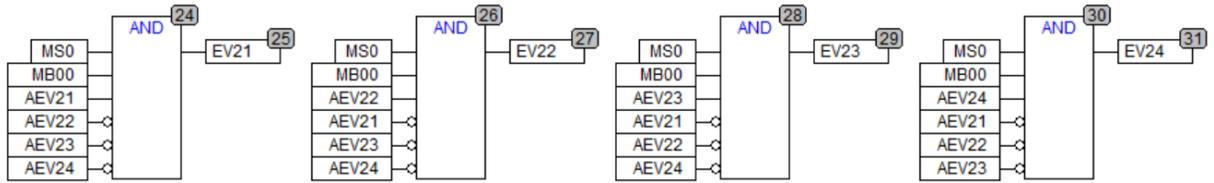


Ilustración 30. Programación en CFC de válvulas de seccionamiento

Fuente: Elaborado por el autor

Los sensores de presión proporcionan el valor de su medición al PLC en amperios, estos valores deben convertirse mediante una transformación lineal para que el operario pueda interpretarlos de la manera correcta. En la ilustración 31 se puede observar la programación mediante el bloque de función LIN_TRAFO, este bloque realiza una transformación lineal utilizando los valores mínimos y máximos a la entrada, para dar una aproximación lineal del valor de salida. Ambos bloques de función que se muestran en dicha ilustración, tienen exactamente las mismas variables de salida puesto que son dos sensores iguales que se colocan en distintos puntos del sistema.

Linealización de sensores

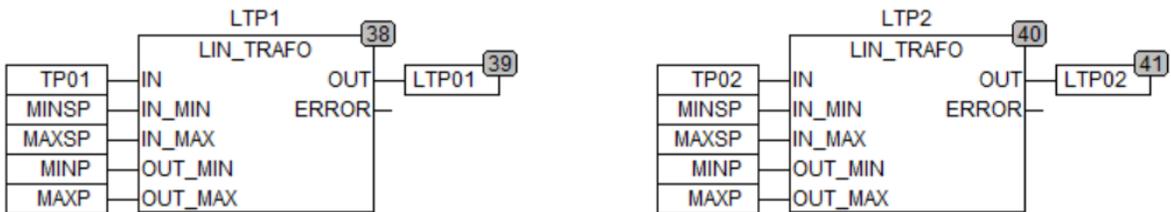


Ilustración 31. Bloques de función para linealización de sensores

Fuente: Elaborado por el autor

En la ilustración 32 se detallan los valores de entrada que puede recibir el PLC, y los valores de salida según el datasheet del sensor de presión a utilizar.

MINSP: REAL:=0;
 MAXSP: REAL:=27648;
 MINP: REAL:=0;
 MAXP: REAL:=10;

Ilustración 32. Parámetros para linealización de sensores

Fuente: Elaborado por el autor

De esta misma manera se realizó la transformación lineal de los sensores de humedad en campo. Con la programación establecida y verificada, se prosiguió a realizar la programación de la HMI según las variables internas y físicas del PLC, colocando colores amigables para una correcta visualización del operario. En la ilustración 33 se observa el diseño de HMI propuesto para el control del sistema.

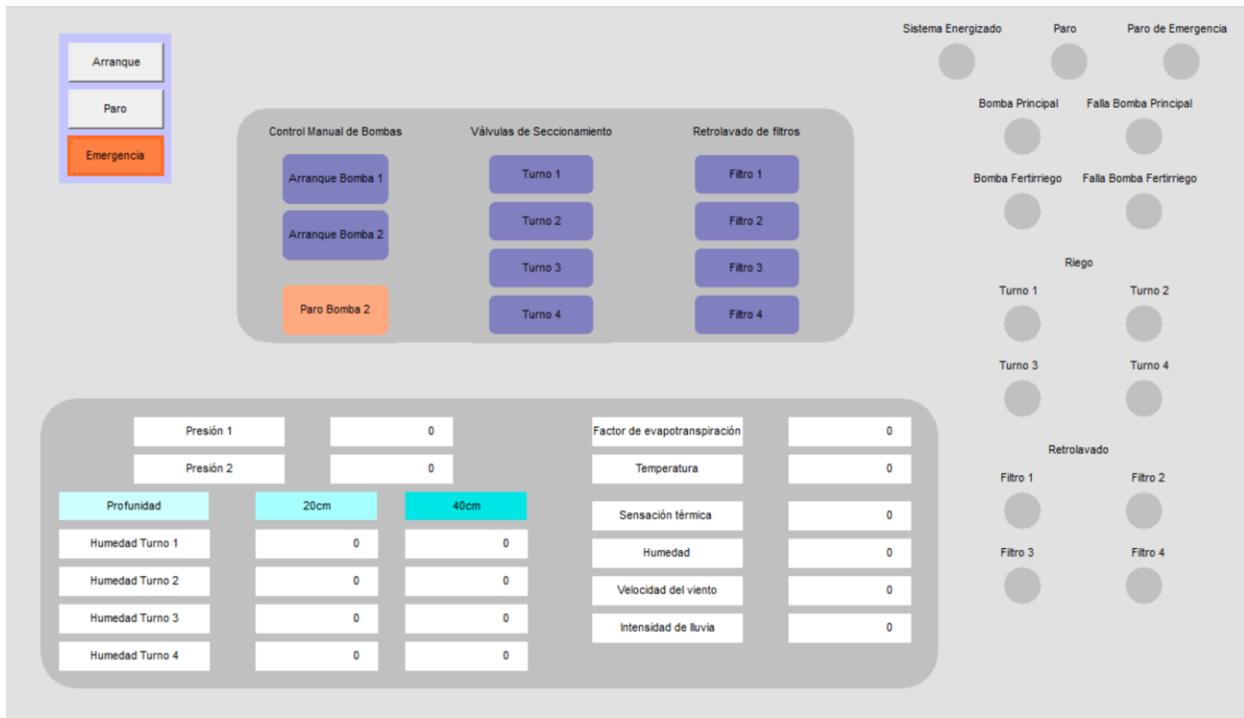


Ilustración 33. Diseño de HMI

Fuente: Elaborado por el autor

4.5.7 COMUNICACIÓN DEL PLC

Como bien se menciona en la sección 3.6.6, existen diversos protocolos de comunicación entre un PLC y sus módulos de entradas, salidas y de radiofrecuencia. En este caso se determinó que el estándar de comunicación adecuado es el MODBUS TCP. Este protocolo es el más utilizado en la industria de la automatización, es de sencilla implementación, posee una elevada flexibilidad con conectividad casi ilimitada lo que garantiza una transmisión de datos ultra rápida, es confiable e integra una verificación de error en las tramas.

Los equipos con los que se está trabajando admiten perfectamente este protocolo de comunicación. En la ilustración 34 se realiza la configuración de la dirección IP del PLC maestro.



Ilustración 34. Configuración maestro protocolo de comunicación

Fuente: Elaborado por el autor

En la ilustración 35 se observa la configuración de la dirección IP del esclavo, el tiempo de respuesta y el puerto asignado.

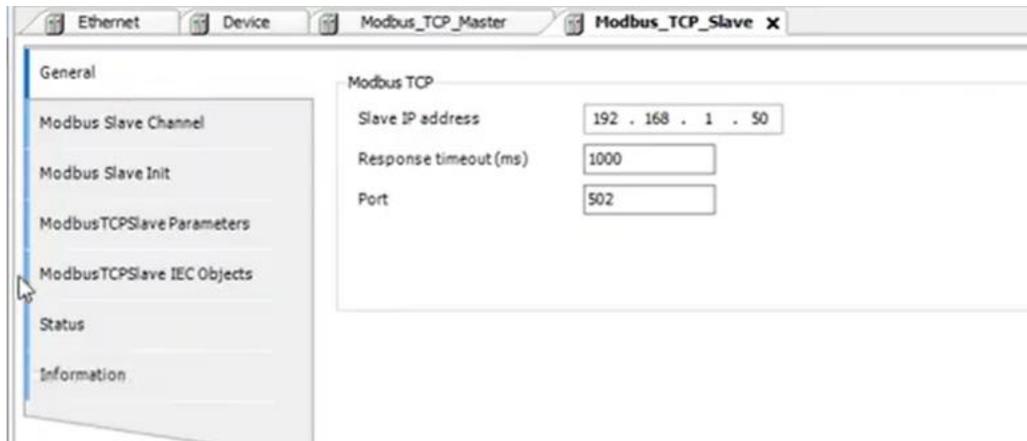


Ilustración 35. Configuración Esclavo protocolo de comunicación

Fuente: Elaborado por el autor

En la pestaña de configuración MODBUS del esclavo, es donde se configuran todas las variables de entrada y de salida de este, mismas que posteriormente se incorporarán en la programación general del sistema. En la ilustración 36 se muestra un ejemplo de cómo se vería el mapeo de dichas señales.

Variable	Mapping	Channel	Address	Type	Unit	Description
		Channel 0	%IW0	ARRAY [0..9] OF WORD		Read Input Registers
		Channel 0[0]	%IW0	WORD		0x0000
		Channel 0[1]	%IW1	WORD		0x0001
		Channel 0[2]	%IW2	WORD		0x0002
		Channel 0[3]	%IW3	WORD		0x0003
		Channel 0[4]	%IW4	WORD		0x0004
		Channel 0[5]	%IW5	WORD		0x0005
		Channel 0[6]	%IW6	WORD		0x0006
		Channel 0[7]	%IW7	WORD		0x0007
		Channel 0[8]	%IW8	WORD		0x0008
		Channel 0[9]	%IW9	WORD		0x0009

Ilustración 36. Mapeo de señales del esclavo

Fuente: Elaborado por el autor

4.6 METODOLOGÍA DE VALIDACIÓN

4.6.1 SELECCIÓN DE TUBERÍA Y BOMBA

Para comprobar la correcta selección de la tubería y la bomba se realizaron los cálculos pertinentes mediante el uso de la ecuación general de la energía. Gracias a la información encontrada en diversas bibliografías se logró determinar el caudal total que necesitaría nuestro sistema, basándose en el caudal de cada gotero y el total de los mismo, a conveniencia el total de área a irrigar se dividió en cuatro turnos, así el caudal necesario sería menor y por ende se necesitaría una bomba de menor potencia y menor caudal. En la ilustración 17 de la sección 4.5.3 se muestran los parámetros calculados para la determinación de la potencia de la bomba.

4.6.2 PROGRAMACIÓN PLC

La programación se validó mediante el compilador del software CODESYS, este verificó la sintaxis utilizada en los bloques de función. De igual forma se verificó el encendido y apagado de las señales del sistema establecidas en la consigna del anexo 4.

4.6.3 CONEXIONES DE CONTROL

La validación de las conexiones de instrumentación con el sistema de control se realizó mediante el software AutoCAD, en donde se realizaron las conexiones pertinentes con ayuda de las librerías y manual técnico del controlador programable, se pueden encontrar en el anexo 6.

4.7 CRONOGRAMA DE ACTIVIDADES

Cronograma de Actividades										
Actividades	Semana 1	Semana 2	Semana 3	Semana 4	Semana 5	Semana 6	Semana 7	Semana 8	Semana 9	Semana 10
Analizar el entorno de automatización de riego en Honduras.										
Identificar trabajos de automatización de riego por goteo y fertirrigación.										
Diseñar el sistema hidráulico y seleccionar la bomba a utilizar.										
Seleccionar los sensores y actuadores industriales adecuados para el sistema.										
Establecer las conexiones del controlador programable con la instrumentación.										
Desarrollar la programación del control automatizado.										
Determinar la forma de comunicación de los módulos de radiofrecuencia.										
Realizar una estimación de costos para el proyecto.										

Ilustración 37. Cronograma de Actividades

Fuente: Elaborado por el autor.

V. RESULTADOS Y ANÁLISIS

Se obtuvo el diseño de un sistema automatizado de fertirriego por goteo, en esta sección se analizarán los resultados en base a los objetivos específicos del proyecto.

5.1 ANÁLISIS DEL ENTORNO DE LA PRODUCCIÓN Y AUTOMATIZACIÓN DE RIEGO PARA CAÑA DE AZÚCAR

Durante la visita técnica a las instalaciones de la Compañía Azucarera Tres Valles San Juan de las Flores, Francisco Morazán, se analizó el entorno de control del sistema de riego de las fincas observando que solo hay cuatro fincas parcialmente automatizadas. El encendido y apagado de los motores de las bombas, el sistema de fertirriego y el manifold son completamente manuales, por otro lado las válvulas de seccionamiento y los sensores de humedad en los puntos de sensado en campo si son monitorizados por un sistema de control instalado por un proveedor de la empresa, sin embargo, este es un sistema que apenas está a prueba por lo que se necesita que los trabajadores estén verificando que el sistema se encuentre en funcionamiento de manera constante.

Adicional a esto, la fertilización por inyección se realiza solo una vez cada quince días porque al ser un sistema completamente manual se hace uso de más de diez personas para dicho proceso, por lo que no se puede realizar en repetidas ocasiones durante el mes. Esta manera de aplicación repercute en un menor aprovechamiento de los nutrientes por parte de la planta.

Utilizando a la Compañía Azucarera Tres Valles, nos podemos hacer una idea del entorno de la automatización en sistemas de riego para la caña de azúcar en el país, dejando en evidencia que se utilizan sistemas completamente manuales con un fertirriego no tan eficiente como se desea.

5.2 IDENTIFICACIÓN DE TRABAJOS SIMILARES SOBRE EL RIEGO POR GOTEO

En el estudio de trabajos similares sobre riego por goteo, se tomó en consideración principalmente el trabajo del autor Fredy Cruz en el diseño de un sistema de riego por goteo en el área de El Zamorano, Honduras. En dicho trabajo el autor trata las características de los cultivos a irrigar, la duración de las etapas del cultivo, el coeficiente de evapotranspiración para las épocas

de siembra de los cultivos, los intervalos y tiempos de riego, e incluso la determinación de las tuberías. Los aspectos mencionados anteriormente, representan un factor importante en la irrigación de las plantas.

Analizando a profundidad, nos damos cuenta de que la caña de azúcar tiene distintas necesidades de riego dependiendo de la etapa de cultivo en la que se encuentre, por lo que el realizar un sistema de control completamente automático representa una dificultad bastante alta. Siempre es necesario que el sistema tenga un operario humano para estar monitoreando los parámetros que indican cuándo es el momento de realizar la irrigación.

También se comprendió sobre el uso de distintos métodos para la aplicación de las soluciones fertilizantes mediante sistemas de riego por goteo que existen actualmente, lo que derivó al diseño realizado en el presente trabajo según la consideración de un óptimo rendimiento y buen aprovechamiento de los nutrientes aplicados en las plantas.

5.3 DETERMINACIÓN DEL SISTEMA HIDRÁULICO

Para el diseño del sistema hidráulico, se seleccionó los diámetros de la tubería y la bomba centrífuga adecuada para la impulsión del fluido. Siendo dichas tuberías de 10", 8" y 4", manejando un flujo de $166 \frac{m^3}{h}$. También hizo selección de una Bomba Booster para la inyección de la solución fertilizante, dicha bomba manejando un flujo de $10 \frac{m^3}{h}$ en una tubería de 2" instalada después del sistema de filtración.

El sistema de filtración consta de cuatro filtros de grava y dos filtros de anillos. La cantidad de los filtros se determinó mediante el flujo total del sistema, y el flujo máximo que los filtros pueden tener de manera individual. En la ilustración 38 se encuentra un diagrama de bloques que muestra las etapas del sistema hidráulico.

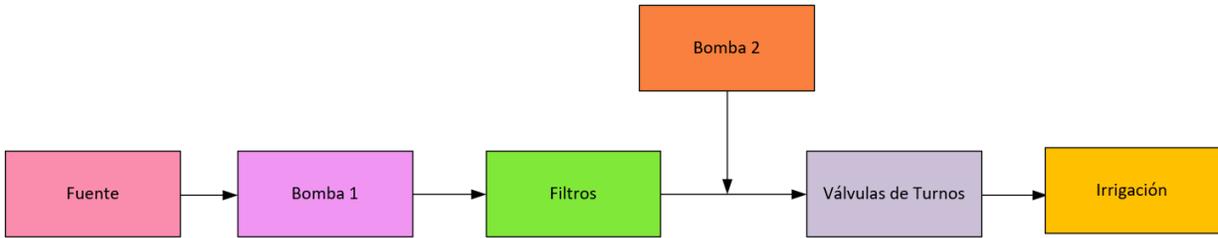


Ilustración 38. Diagrama de bloques del sistema

Fuente: Elaborado por el autor

5.4 SELECCIÓN DE LOS SENSORES Y ACTUADORES INDUSTRIALES

Se seleccionaron los sensores y actuadores adecuados según el tipo de sistema que se está trabajando, dichos elementos se detallan a continuación.

- Humedad relativa: Sensor de humedad OXT-TR RS485, sensor de alta precisión adecuado para suelos de cualquier tipo, hecho de acero inoxidable con protección IP68, implementado en riego, tratamiento de aguas residuales e invernaderos. Fuente de alimentación de 12-24V DC, rango de medición 0-100%, salida analógica de 0-10V y 4-20mA.
- Presión: Sensor de presión IFM rosca G, con protección IP69K, rango de medición 0-10 bar, con salida analógica de 4-20 mA.
- Bomba centrífuga: Goulds pump serie 3656 modelo 15AI/BF 4X6-13, Goulds Water Technology. Con diámetro de impulsión de 10 7/8", 30HP, 60Hz-1750 rpm, apta para un flujo máximo $281 \frac{m^3}{h}$.
- Bomba de inyección: Goulds booster pump serie e-SV modelo 10SV10FC8C60, Goulds Water Technology- Con diámetro de succión y descarga de 2", 1HP, 60Hz-1750rpm, operación máxima de 580psi.

5.5 PROGRAMACIÓN DEL CONTROLADOR LÓGICO PROGRAMABLE

Para la programación del controlador lógico programable se obtuvieron los resultados verificando la interfaz máquina-humano. En la ilustración 38 se presenta la HMI cuando el sistema se encuentra paro. En la ilustración 40 se presenta la HMI cuando el sistema ya se energizó pero no se ha comenzado la irrigación.



Ilustración 39. Sistema en Paro

Fuente: Elaborado por el autor



Ilustración 40. Energizado del Sistema

Fuente: Elaborado por el autor

En la ilustración 41 se presenta la HMI cuando el sistema encendió de manera automática la bomba principal luego de unos minutos de haber energizado el sistema, o de manera manual mediante el pulsador en pantalla.



Ilustración 41. Arranque de bomba principal

Fuente: Elaborado por el autor

Luego de encender la bomba principal, se prosigue con el encendido de la bomba de fertirriego y la apertura de las válvulas de seccionamiento. En las ilustraciones 42, 43, 44 y 45, se muestra la apertura de las electroválvulas de seccionamiento del turno 1, turno 2, turno 3 y turno 4, respectivamente.



Ilustración 42. Apertura de electroválvula del turno 1 y fertirriego activado



Ilustración 43. Apertura de electroválvula turno 2

Fuente: Elaborado por el autor



Ilustración 44. Apertura de electroválvula turno 3



Ilustración 45. Apertura de electroválvula turno 4

Fuente: Elaborado por el autor

El retrolavado de filtros se realiza uno a la vez y cuando la bomba de fertirriego no esté en funcionamiento. En las ilustraciones 46, 47, 48 y 49 se observa la apertura de las electroválvulas para el retrolavado de los filtros 1, 2, 3 y 4, respectivamente. Esta tarea se realiza de manera completamente manual a criterio del operario del sistema. Finalmente, en la ilustración 50 se muestra el sistema en paro de emergencia.



Ilustración 46. Apertura de electroválvula para retrolavado filtro 1

Fuente: Elaborado por el autor

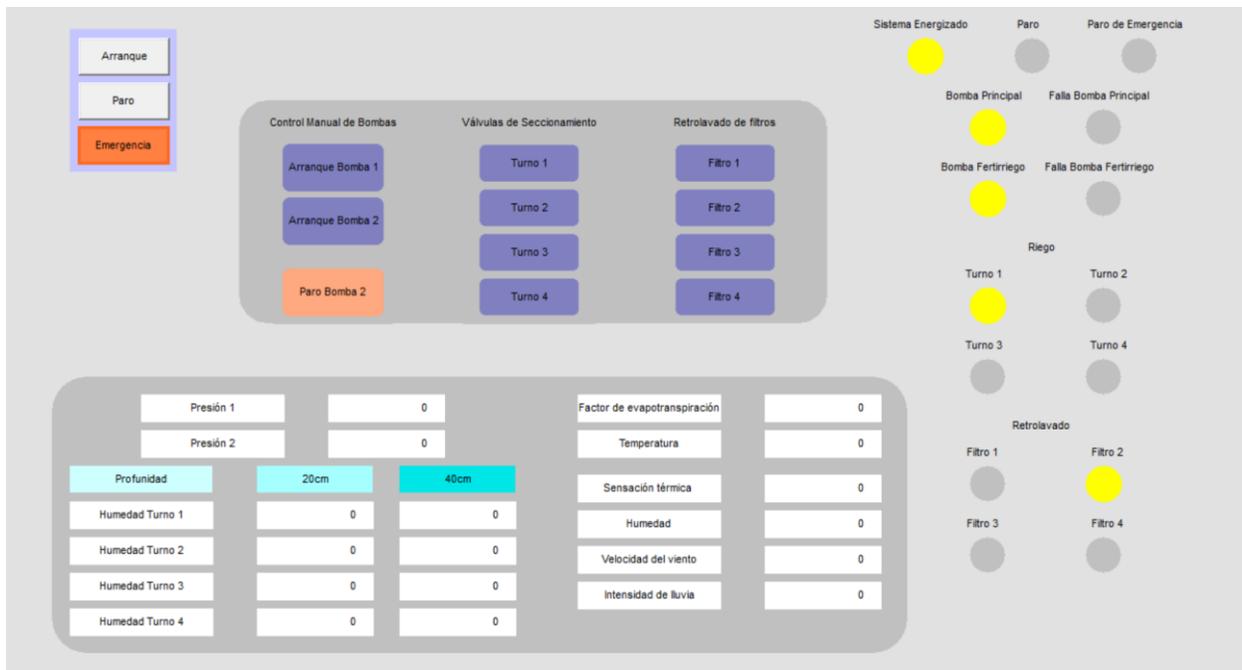


Ilustración 47. Apertura de electroválvula para retrolavado filtro 2



Ilustración 48. Apertura de electroválvula para retrolavado filtro 3

Fuente: Elaborado por el autor



Ilustración 49. Apertura de electroválvula para retrolavado filtro 4

Fuente: Elaborado por el autor



Ilustración 50. Sistema en Paro de Emergencia

Fuente: Elaborado por el autor

5.6 ESTIMACIÓN DE COSTOS DEL PROYECTO

Para generar la estimación de costos de implementación del proyecto fue necesario realizar cotizaciones en diferentes empresas encargadas de proveer los materiales adecuados, dichas cotizaciones por llamada, página web de las tiendas, o cotizaciones formales. Para la instrumentación y control se cotizó en la empresa C&D Technology, BOMOHS, Ramon & Dania Industrial y Conersa. Para el sistema hidráulico se cotizó en la ferretería Larach&Cía, COMPASA y Grupo TECUN.

Una vez obtenidos los datos de las empresas se realizó la estimación de costos para la aplicación del sistema de fertirriego en un área de 40 ha, esta sin incluir mano de obra y precios de instalación. En caso de querer instalar el sistema para una mayor o menor área de terreno, sería imprescindible generar un nuevo presupuesto.

En la ilustración 51 se puede observar el detalle del presupuesto en lempiras y en dólares, a una tasa de cambio de USD 1 a L 24.49 a la fecha 16 de marzo de 2022, obteniendo un total de L 1,920,285.98 (USD 79,149.58).

Elemento	Cantidad	Precio unitario (LPS)	Precio unitario (USD)	Costo total (LPS)	Costo total (USD)
Pulsador de emergencia	1	L 740.01	\$ 30.22	L 740.01	\$ 30.22
PLC PM564 TP-ETH ABB	1	L 15,945.50	\$ 651.10	L 15,945.50	\$ 651.10
Módulo de salidas digitales DO561 ABB	1	L 3,295.66	\$ 134.57	L 3,295.66	\$ 134.57
Fuente de alimentación SD822X ABB	1	L 3,983.52	\$ 162.66	L 3,983.52	\$ 162.66
HMI CP607 ABB	1	L 24,696.72	\$ 1,008.44	L 24,696.72	\$ 1,008.44
Gabinete metálico RAL7035 ABB	1	L 3,734.30	\$ 152.48	L 3,734.30	\$ 152.48
Módulo de radiofrecuencia Phoenix contact	4	L 9,593.47	\$ 391.73	L 38,373.87	\$ 1,566.92
Fuente de alimentación para módulo radio	4	L 1,023.68	\$ 41.80	L 4,094.73	\$ 167.20
Convertidor DC 12-24DC	4	L 2,767.37	\$ 113.00	L 11,069.48	\$ 452.00
Panel fotovoltaico 12V, 30W	4	L 1,536.75	\$ 62.75	L 6,146.99	\$ 251.00
Batería de 12V amp	8	L 1,150.00	\$ 46.96	L 9,200.00	\$ 375.66
Cable 1m N-RSMA	4	L 1,192.91	\$ 48.71	L 4,771.63	\$ 194.84
Módulo E/S Phoenix contact 4AI	4	L 6,697.77	\$ 273.49	L 26,791.08	\$ 1,093.96
Estación meteorológica Davis Instruments + Modbus RTU Gateway	1	L 20,984.99	\$ 856.88	L 20,984.99	\$ 856.88
Filtro de grava Yamit 3x30"	2	L 84,140.78	\$ 3,435.72	L 168,281.57	\$ 6,871.44
Filtro de anillos ARKAL 120 mesh	2	L 30,065.64	\$ 1,227.67	L 60,131.28	\$ 2,455.34
Bomba Centrífuga Goulds Water Technology	1	L 331,139.33	\$ 13,521.41	L 331,139.33	\$ 13,521.41
Bomba Booster Gould Water Technology	1	L 71,034.47	\$ 2,900.55	L 71,034.47	\$ 2,900.55
Sensor de humedad	8	L 1,885.73	\$ 77.00	L 15,085.84	\$ 616.00
Sensor de presión	2	L 4,451.51	\$ 181.77	L 8,903.02	\$ 363.54
Válvula con solenoide 4"	4	L 10,098.45	\$ 412.35	L 40,393.81	\$ 1,649.40
Válvula con solenoide 2"	1	L 6,219.24	\$ 253.95	L 6,219.24	\$ 253.95
Válvula de alivio 8"	1	L 5,765.00	\$ 235.40	L 5,765.00	\$ 235.40
Válvula cheque 8"	1	L 5,662.44	\$ 231.21	L 5,662.44	\$ 231.21
Válvula cheque 2"	1	L 756.00	\$ 30.87	L 756.00	\$ 30.87
Codo de 90° 4"	2	L 280.00	\$ 11.43	L 560.00	\$ 22.87
Tee de flujo 4"	2	L 385.00	\$ 15.72	L 770.00	\$ 770.00
Tanque de almacenamiento 2500L	1	L 9,794.01	\$ 399.92	L 9,794.01	\$ 399.92
Tubería de acero cédula 40 2" 6mts	1	L 5,341.93	\$ 218.13	L 5,341.93	\$ 218.13
Tubería de acero cédula 40 8" 6mts	1	L 40,057.30	\$ 1,635.66	L 40,057.30	\$ 1,635.66
Tubería de acero cédula 40 10" 6mts	1	L 38,133.91	\$ 1,557.12	L 38,133.91	\$ 1,557.12
Tubería de PVC cédula 40 2" 6mts	1	L 840.00	\$ 34.30	L 840.00	\$ 34.30
Tubería de PVC cédula 40 4" 6mts	318	L 2,650.00	\$ 108.21	L 842,258.33	\$ 34,391.93
Tubería de PVC cédula 40 8" 6mts	1	L 2,100.00	\$ 85.75	L 2,100.00	\$ 85.75
Tubería de PVC cédula 40 10" 6mts	1	L 3,600.00	\$ 147.00	L 3,600.00	\$ 147.00
Cinta de goteo rollo 3050mts	22	L 4,100.00	\$ 167.42	L 89,630.03	\$ 3,659.86
Total				L 1,920,285.98	\$ 79,149.58

Ilustración 51. Estimación de Costos del Proyecto

Fuente: Elaborado por el autor

VI. CONCLUSIONES

- Se diseñó un sistema de fertirriego automatizado para el monitoreo de los parámetros ambientales involucrados en la producción de caña de azúcar en un área de cuarenta hectáreas.
- Se analizó el entorno de la producción y automatización del riego de la caña de azúcar en Honduras, comprendiendo que en el país la gran mayoría del riego en la producción de la caña de azúcar se realiza de manera manual, considerando que en algunos casos tienen sistemas instalados que nunca fueron puestos en marcha y en otros, sistemas parcialmente automatizados.
- Se identificaron diversos trabajos similares de la automatización de sistemas de riego por goteo, cabe destacar que ninguno de estos acoplaba directamente un sistema de fertirriego por inyección controlado como el presentado en este proyecto.
- Se estableció el diseño hidráulico y las bombas que se adecúan a las necesidades de flujo del sistema de riego, procurando la minimización de pérdidas por fricción y por los elementos de filtrado y control del sistema.
- Se seleccionaron los sensores y los actuadores industriales adecuados para el sistema de riego propuesto, tomando en consideración el ambiente en el cuál serán instalados.
- Se especificaron las conexiones de control de los sensores y actuadores seleccionados mediante el uso de los manuales de fabricante y su indicación de conexión.
- Se realizó la programación de control automatizado de fertirrigación para la caña de azúcar según la consigna establecida, sin embargo, no se realizó específicamente para cada etapa de crecimiento del cultivo como se había definido inicialmente.
- Se determinó una lámina de riego preestablecida de 5mm considerando las necesidades hídricas de la planta, dicha lámina de riego gracias a la bomba seleccionada se alcanza en 3 horas, obteniendo un tiempo de riego de 45 minutos por turno.
- Se logró facilitar al operario la decisión del momento clave de irrigación, esto mediante la ayuda de los datos de los sensores de campo y de la estación meteorológica seleccionada.

- Se determinó que la forma adecuada para la comunicación de los datos de los sensores de campo es mediante módulos de radiofrecuencia, dichos módulos conectados al controlador programable maestro mediante el protocolo MODBUS TCP.
- Se realizó la estimación de costos del sistema de fertirriego automatizado.

VII. RECOMENDACIONES

- Se recomienda realizar la calibración de los sensores, esto en caso de montar en físico este sistema de irrigación.
- El sistema está seccionado por 4 válvulas que dividen el terreno en 4 partes (cada seccionamiento de 10ha), por lo que se recomienda irrigar una sección a la vez, esto para no sobrecargar la bomba principal del sistema, ya que el sistema fue diseñado para que se realice de esta manera.
- Se recomienda colocar la señalización pertinente en campo, en las áreas donde se encuentren instalados los sensores de humedad, esto para evitar que alguien los dañe durante mantenimiento del sistema u otros procedimientos a cargo de los agricultores.
- Se recomienda revisar con frecuencia los canales de alimentación por si hay fugas de agua o taponamiento en los goteros.
- Si es necesario instalar suficientes tanques de almacenamiento para solución fertilizante y aplicación de químicos, se recomienda acoplar las tuberías a la línea de succión principal de la bomba de fertirriego e instalar válvulas para cada tanque.
- Se recomienda realizar el retrolavado de filtros uno a la vez, esto para no ocasionar caídas de presión importantes en el sistema ya que se realiza mientras se está irrigando.

VIII. APLICABILIDAD

El proyecto puede ser implementado en cualquier lugar del país donde se encuentre un terreno de 40 ha, con un ángulo de inclinación de pendiente no mayor a 5°, con una fuente de agua cercana al área de cultivo, con suelo del tipo franco arcilloso y condiciones climáticas propicias para el cultivo de la caña de azúcar.

IX. EVOLUCIÓN DEL TRABAJO ACTUAL

Como siguiente paso de este proyecto, se propone realizar un estudio de ROI (por sus siglas en inglés, retorno de inversión), para determinar la viabilidad financiera del proyecto. Esto con el fin de proceder con el montaje e instalación del sistema dentro de los parámetros establecidos, para reforzar la validación que comprueba su correcto funcionamiento y transmisión de los parámetros necesarios para la toma de decisiones de irrigación por parte de los operarios del sistema.

Con la base establecida en la presente investigación, también se propone estudiar y aplicar un monitoreo remoto con almacenamiento de datos en la nube.

BIBLIOGRAFÍA

- Álvarez Pulido, M. (2007). *Controladores lógicos*. Marcombo.
- ANDI. (31 de Enero de 2020). *La caña de azúcar de Honduras es puro desarrollo para el país*. Obtenido de ANDI;: <http://www.andi.hn/boletin/2020/01/31/la-cana-de-azucar-de-honduras-es-puro-desarrollo-para-el-pais/>
- AutoSolar. (2022). *Panel Solar Monocristalino y Policristalino* . Obtenido de Autosolar: Energía Solar: <https://autosolar.es/panel-solar-24-voltios/panel-solar-570w-monocristalino-jinko>
- Bustamante, A. J. (2004). *Evaluación de Tres Niveles de Humedad en el Suelo en el Cultivo de Chile Anaheim bajo Condiciones de Acolchado Plástico y Riego por Goteo*. Buenavista: Universidad Autónoma Agraria "Antonio Narro" .
- C&D Tecnología. (2022). *Sensor de humedad, temperatura y conductividad del suelo*. Obtenido de C&D Tecnología: <https://cdtecnologia.net/sensores/2959-sensor-de-humedad-temperatura-y-conductividad-del-suelo-oxt-tr-rs485-0002959.html>
- Centalsa. (2010). *Cables para Instrumentación y Control*. Yumbo, Valle del Cauca, Colombia.
- Cevallos Zambrano, C. P. (2008). *Diseño y cálculo de un sistema de riego por goteo para 32ha de cultivos hortícolas y 5ha de cultivos orgánicos en El Zamorano, Honduras*. Zamorano: Universidad Zamorano.
- COMPASA. (15 de Marzo de 2022). *Cotización de tubería de acero*. Obtenido de Comercializadora de Productos Agroindustriales.
- Daneri, P. A. (2009). *PLC: automatización y control industrial*. Editorial Hispano Americana HASA.
- Davis Instruments. (2022). *Vantage Pro2 Weather Station*. Obtenido de Davis Instruments: <https://www.davisinstruments.com/products/vantage-pro2-weatherlink-live-bundle-with-console>
- EATHISA. (2018). *Productos y Equipos: Bomba Booster*. Obtenido de EATHISA Productos: <http://eathisa.com/productos/bomba-booster/>

Edimar. (2020). *¿Qué es un sistema HMI?* Obtenido de Edimar: <https://edimar.com/hmi-tipos-y-funciones/>

Equipos Industriales. (2022). *Tienda en línea Equipos Industriales*. Obtenido de Equipos Industriales: equiposindustriales.com

FAO. (2000). *Evapotranspiración del cultivo*. Obtenido de FAO: <https://www.fao.org/3/x0490s/x0490s.pdf>

Ferretería Faraj. (2022). *Tienda en Línea Ferrería Faraj*. Obtenido de Ferrería Faraj: <https://ferreteriafaraj.com/>

FUNDAHRSE. (30 de Diciembre de 2016). *La caña de azúcar es proclamada como el cultivo más importante según la UNESCO*. Obtenido de FUNDARHRSE: <https://fundahrse.org/la-cana-de-azucar-es-proclamada-como-el-cultivo-mas-importante-segun-la-unesco/#:~:text=Honduras%20produce%20m%C3%A1s%20de%20cinco,ciento%20restante%20a%20productores%20independientes.>

Futurcrop. (12 de Febrero de 2020). *Incidencia del riego por goteo en el control de plagas*. Obtenido de Futurcrop: <https://futurcrop.com/es/blog/post/incidencia-del-riego-por-goteo-en-el-control-de-plagas>

Glaría, J. (2011). *Automatización Industrial: Sensores de Humedad*. Universidad Técnica Federico Santa María.

Goulds Water Technology. (Diciembre de 2013). *e-SV Series*. Obtenido de Pump Catalog: <https://d1pkofokfruj4.cloudfront.net/media/upload/resource/jj/Goulds-Pumps-E-SV-SS-Vertical-Multi-Stage-Pump-Brochure.pdf>

Goulds Water Technology. (2021). *Bomba de agua 3656 S, 3756 S series*. Obtenido de Direct Industry: <https://www.directindustry.es/prod/goulds-pumps/product-14176-699075.html>

Grupo TECUN. (16 de Marzo de 2022). *Cotización Cintas de Riego*. Obtenido de Grupo TECUN.

Harper, J. K. (23 de Febrero de 2016). *Riego por Goteo para la Producción Vegetal*. Obtenido de PennState Extension: <https://extension.psu.edu/riego-por-goteo-para-la-produccion-vegetal>

- Larach & Cía. (2022). *Tienda en línea Larach & Cía*. Obtenido de Larach y Cía:
<https://larachycia.com/>
- M&M international. (2012). *Catálogo de electroválvulas*. Obtenido de mmiberica:
<http://www.mmiberica.com/Descargas/ELECTROVLVULASYBOBINAS.pdf>
- MAHER. (2020). *Estación meteorológica para agricultura*. Obtenido de MAHER:
<https://www.maherelectronica.com/sensores-agricolas-clima/estacion-meteorologica-para-agricultura/>
- Moreno Castro, J. (2011). *Bombas hidráulicas*. Málaga, España: Editorial ICB.
- Mormeneo, I. (2007). *¿Qué es la Agrometeorología?* Obtenido de Universidad Nacional del Sur Bahía Blanca: <http://agrometeorologia.criba.edu.ar/>
- Mott, R. L. (2006). *Mecánica de Fluidos*. México: Pearson.
- NETAFIM. (2022). *El riego por goteo revoluciona la agricultura*. Obtenido de NETAFIM GLOBAL:
<https://www.netafim.com.mx/riego-por-goteo/#:~:text=Cualquier%20cultivo%20puede%20crecer%20utilizando,para%20todo%20tipo%20de%20topograf%C3%ADas.>
- Orellana, F. C. (2008). *Diseño de un Sistema de Riego por Goteo en el área de El Llano en El Zamorano*. Obtenido de
<https://bdigital.zamorano.edu/bitstream/11036/856/1/T2572.pdf>
- Phoenix Contact. (2022). *Módulo radio - RAD-2400-IFS - 2901541*. Obtenido de Phoenix Contact:
<https://www.phoenixcontact.com/online/portal/pi/?uri=pxc-oc-itemdetail:pid=2901541&library=pies&pcck=P-08-11-03-08&tab=2&selectedCategory=ALL>
- Prakor. (28 de Septiembre de 2020). *Tipos de tuberías para un sistema de riego por goteo agrícola*. Obtenido de Prakor: <https://prakor.com/tipos-de-tuberias-para-un-sistema-de-riego-por-goteo-agricola/>

- Pump Catalog. (2022). *Goulds Water Technology e-SV Products*. Obtenido de Pump Catalog Goulds: <https://www.pumpcatalog.com/goulds/e-sv-series-stainless-steel-vertical-multi-stage-pump-series/10sv13fc30/>
- RAE. (2022). *Real Academia Española*. Obtenido de RAE: <https://dle.rae.es>
- Ramon & Dania Industrial S.R.L de C.V. (2022). *Cotización Componentes de Automatización*.
- Rotoplas. (2022). *Soluciones Rotoplas para Agroindustria*. Obtenido de Agro-Industria Rotoplas Centroamérica: <https://rotoplascentroamerica.com/mercados/agricultura/>
- Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural. (11 de Diciembre de 2016). *Caña de Azúcar, un gran regalo del campo*. Obtenido de Gobierno de México: <https://www.gob.mx/agricultura/es/articulos/cana-de-azucar-un-gran-regalo-del-campo>
- Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural. (20 de Agosto de 2019). *Etapas de cultivo de la caña*. Obtenido de Gobierno de México: <https://www.gob.mx/agricultura/articulos/etapas-del-cultivo-de-cana>
- Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera. (29 de Abril de 2016). *El Fertiliriego: una solución para cultivos extensivos y un área de oportunidad para la tecnología mexicana*. Obtenido de Gobierno de México: <https://www.gob.mx/siap/articulos/el-fertiliriego>
- Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera. (23 de Enero de 2018). *Cultivos perennes; garantía de alimentación agrícola y humana*. Obtenido de Gobierno de México: <https://www.gob.mx/siap/articulos/cultivos-perennes-garantia-de-alimentacion-agricola-y-humana?idiom=es>
- SiAR. (2016). *Evapotranspiración*. Obtenido de Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación del Gobierno de España: https://www.mapa.gob.es/es/desarrollo-rural/temas/gestion-sostenible-regadios/Evapotranspiraci%C3%B3n_tcm30-82951.pdf
- Tesla Energy. (2021). *Paneles Solares Fotovoltaicos*. Obtenido de Tesla Energy: <https://teslaenergy.cl/paneles-solares-lo-que-necesita-saber-y-mas/>
- Tobajas Vázquez, M. C. (2014). *Instalaciones solares fotovoltaicas*. Cano Pina.

Universidad de Illinois. (2 de Julio de 2013). *Efectos del Exceso de Humedad del Suelo*. Obtenido de FarmProgress: <https://www.farmprogress.com/fertilizer/wet-soils-affect-corn-roots-and-nitrogen-uptake>

Universidad Nacional de la Plata. (2015). *Circuitos Automatismos Eléctricos*. La Plata, Buenos Aires, Argentina.

Vieira, M. (Junio de 2008). *El Desarrollo del Microrriego en América Central*. Obtenido de FAO: <https://www.fao.org/3/aj470s/aj470s.pdf>

Zambrano, P. (2019). *El cultivo de la caña de azúcar*. Obtenido de Agrotendencia: <https://agrotendencia.tv/agropedia/el-cultivo-de-la-cana-de-azucar/>

ANEXOS

Anexo 1. Visita técnica a Compañía Azucarera



Fuente: Elaborado por el autor



Fuente: Elaborado por el autor



Fuente: Elaborado por el autor



Fuente: Elaborado por el autor



Fuente: Elaborado por el autor

Anexo 2. Tablas para determinación del sistema hidráulico

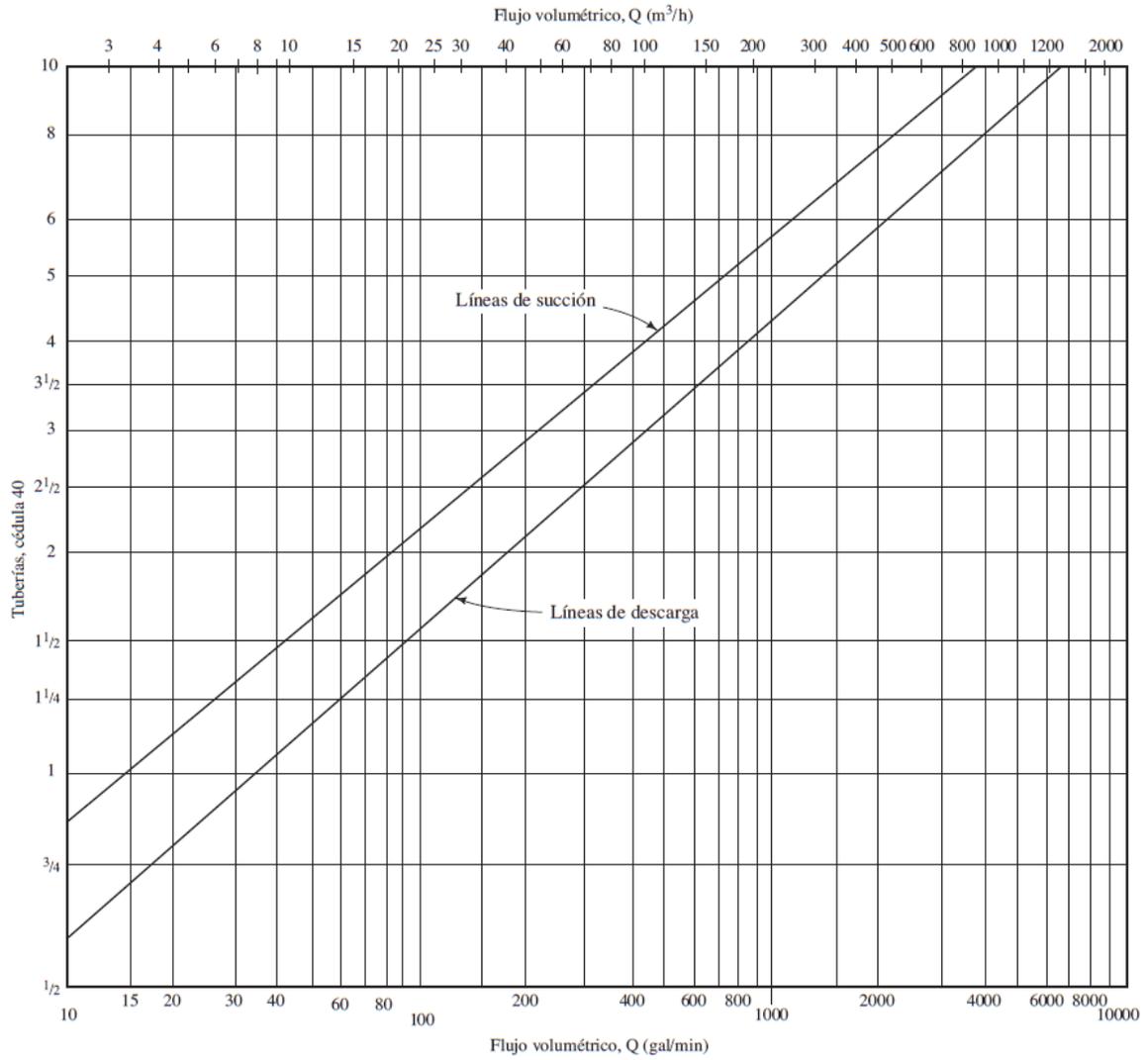


FIGURA 6.2 Ayuda para seleccionar el tamaño de tuberías.

Fuente: (Mott, 2006)

FIGURA 10.4 Expansión gradual.

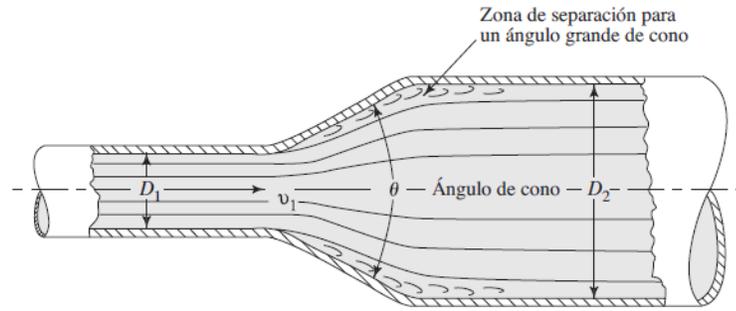
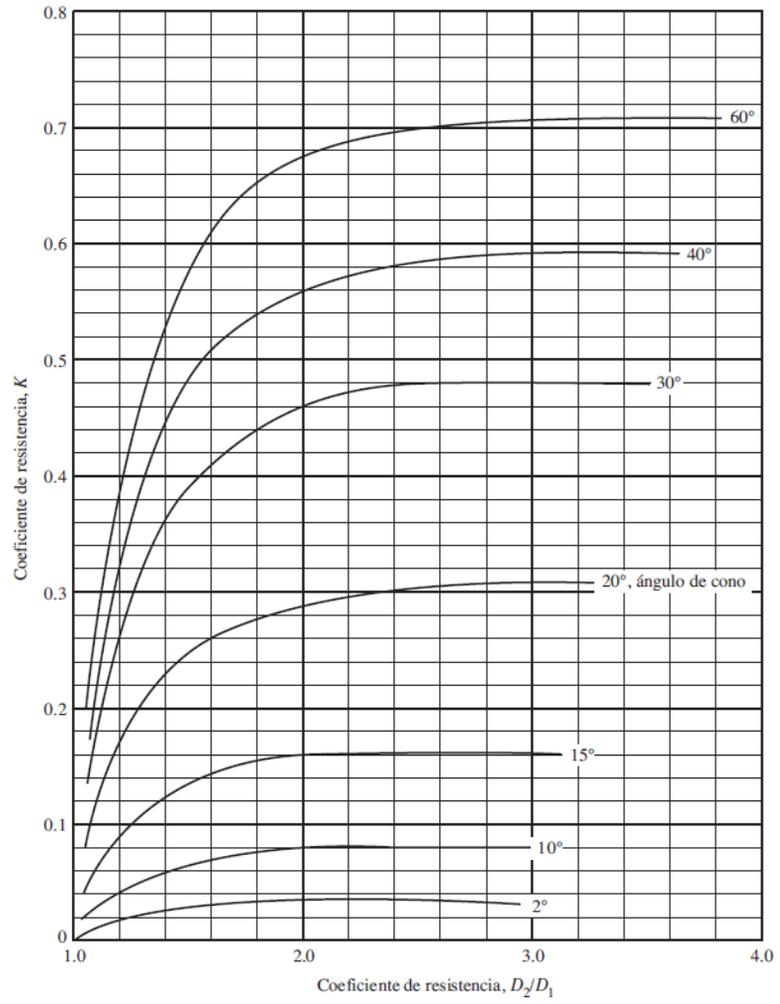


FIGURA 10.5 Coeficiente de resistencia-expansión gradual.



Fuente: (Mott, 2006)

FIGURA 10.11 Coeficiente de resistencia-contracción gradual con $\theta < 15^\circ$.

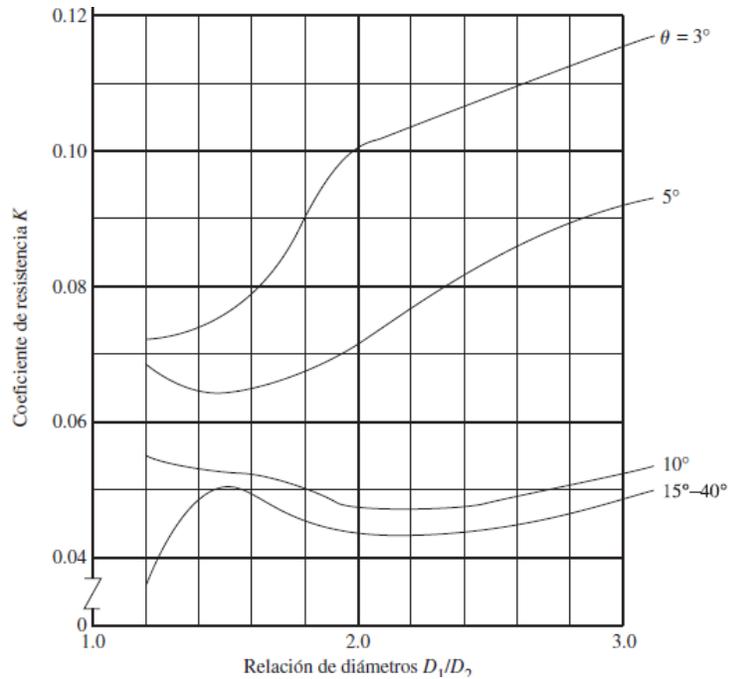


TABLA 10.4 Resistencia de válvulas y acoplamientos, expresada como longitud equivalente en diámetros de tubería L_e/D .

Tipo	Longitud equivalente en diámetros de tubería L_e/D
Válvula de globo—abierta por completo	340
Válvula de ángulo—abierta por completo	150
Válvula de compuerta—abierta por completo	8
— $3/4$ abierta	35
— $1/2$ abierta	160
— $1/4$ abierta	900
Válvula de verificación—tipo giratorio	100
Válvula de verificación—tipo bola	150
Válvula de mariposa—abierta por completo, 2 a 8 pulg	45
—10 a 14 pulg	35
—16 a 24 pulg	25
Válvula de pie—tipo disco de vástago	420
Válvula de pie—tipo disco de bisagra	75
Codo estándar a 90°	30
Codo a 90° de radio largo	20
Codo roscado a 90°	50
Codo estándar a 45°	16
Codo roscado a 45°	26
Vuelta cerrada en retorno	50
Te estándar—con flujo directo	20
—con flujo en el ramal	60

Fuente: (Mott, 2006)

TABLA 10.5 Factor de fricción en la zona de turbulencia completa para tubería de acero comercial, nueva y limpia.

Tamaño nominal de la tubería (pulg)	Factor de fricción f_T	Tamaño nominal de la tubería (pulg)	Factor de fricción f_T
1/2	0.027	3 1/2, 4	0.017
3/4	0.025	5	0.016
1	0.023	6	0.015
1 1/4	0.022	8–10	0.014
1 1/2	0.021	12–16	0.013
2	0.019	18–24	0.012
2 1/2, 3	0.018		

TABLA A.1 Unidades del SI [101 kPa (abs)].

Temperatura (°C)	Peso específico γ (kN/m ³)	Densidad ρ (kg/m ³)	Viscosidad dinámica η (Pa·s)	Viscosidad cinemática ν (m ² /s)
0	9.81	1000	1.75×10^{-3}	1.75×10^{-6}
5	9.81	1000	1.52×10^{-3}	1.52×10^{-6}
10	9.81	1000	1.30×10^{-3}	1.30×10^{-6}
15	9.81	1000	1.15×10^{-3}	1.15×10^{-6}
20	9.79	998	1.02×10^{-3}	1.02×10^{-6}
25	9.78	997	8.91×10^{-4}	8.94×10^{-7}
30	9.77	996	8.00×10^{-4}	8.03×10^{-7}
35	9.75	994	7.18×10^{-4}	7.22×10^{-7}
40	9.73	992	6.51×10^{-4}	6.56×10^{-7}
45	9.71	990	5.94×10^{-4}	6.00×10^{-7}
50	9.69	988	5.41×10^{-4}	5.48×10^{-7}
55	9.67	986	4.98×10^{-4}	5.05×10^{-7}
60	9.65	984	4.60×10^{-4}	4.67×10^{-7}
65	9.62	981	4.31×10^{-4}	4.39×10^{-7}
70	9.59	978	4.02×10^{-4}	4.11×10^{-7}
75	9.56	975	3.73×10^{-4}	3.83×10^{-7}
80	9.53	971	3.50×10^{-4}	3.60×10^{-7}
85	9.50	968	3.30×10^{-4}	3.41×10^{-7}
90	9.47	965	3.11×10^{-4}	3.22×10^{-7}
95	9.44	962	2.92×10^{-4}	3.04×10^{-7}
100	9.40	958	2.82×10^{-4}	2.94×10^{-7}

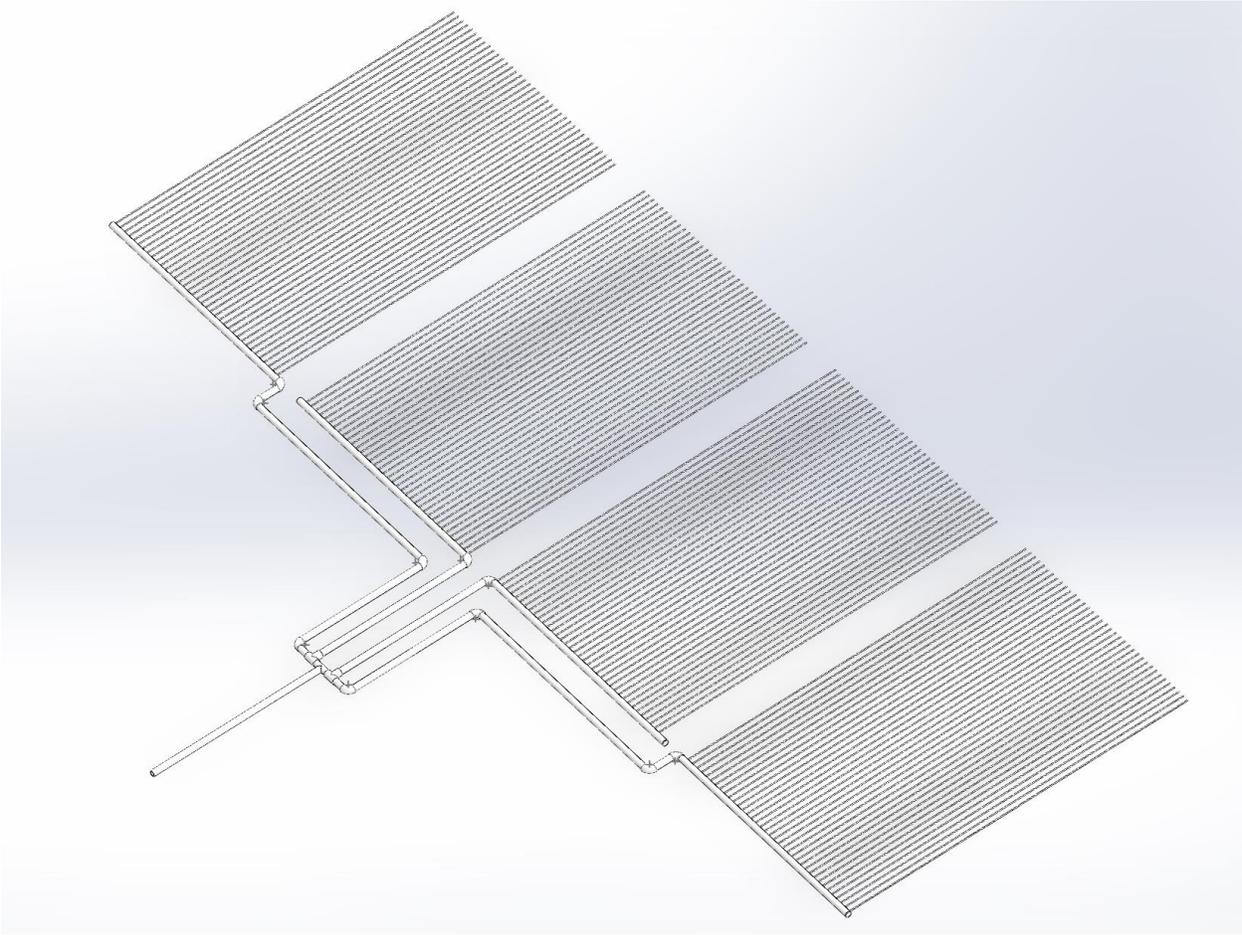
Fuente: (Mott, 2006)

TABLA F.1 Cédula 40.

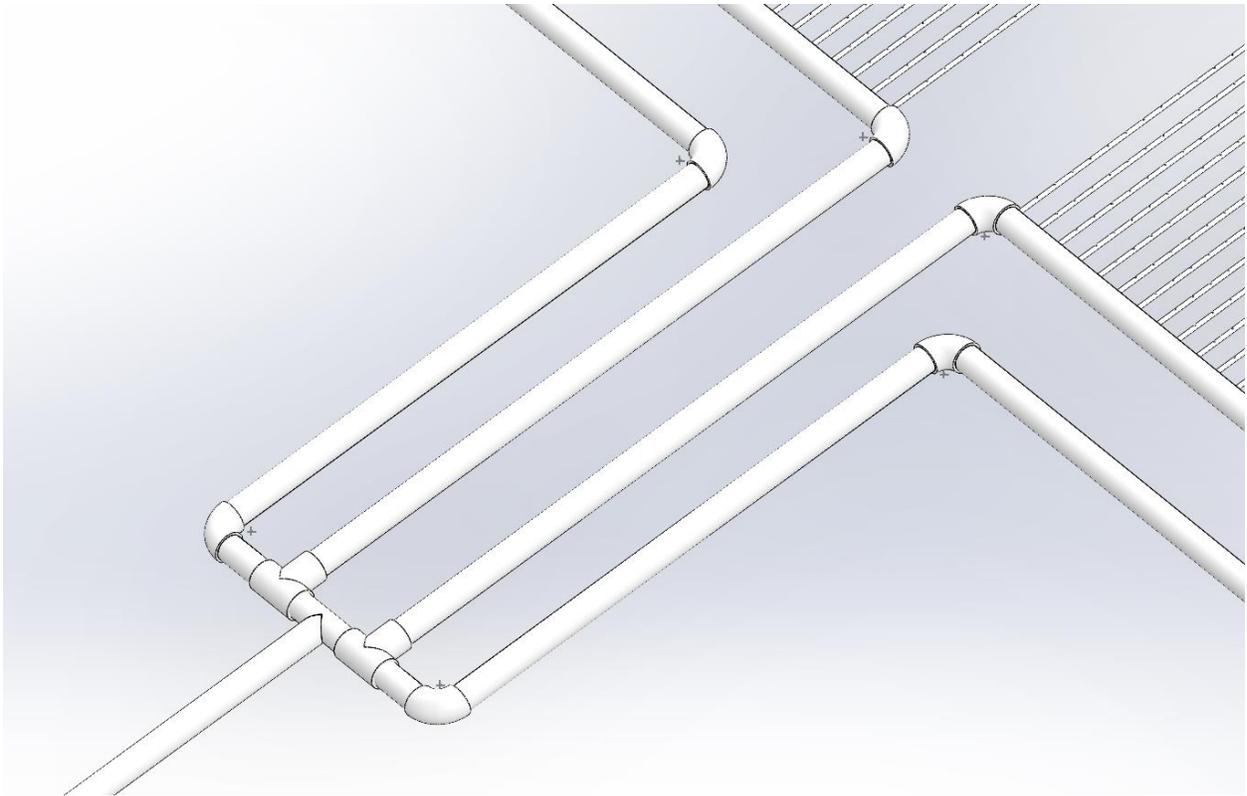
Tamaño nom. de tubería (pulg)	Diámetro exterior		Espesor de pared		Diámetro interior			Flujo de área	
	(pulg)	(mm)	(pulg)	(mm)	(pulg)	(pies)	(mm)	(pies ²)	(m ²)
1/8	0.405	10.3	0.068	1.73	0.269	0.0224	6.8	0.000 394	3.660 × 10 ⁻⁵
1/4	0.540	13.7	0.088	2.24	0.364	0.0303	9.2	0.000 723	6.717 × 10 ⁻⁵
3/8	0.675	17.1	0.091	2.31	0.493	0.0411	12.5	0.001 33	1.236 × 10 ⁻⁴
1/2	0.840	21.3	0.109	2.77	0.622	0.0518	15.8	0.002 11	1.960 × 10 ⁻⁴
3/4	1.050	26.7	0.113	2.87	0.824	0.0687	20.9	0.003 70	3.437 × 10 ⁻⁴
1	1.315	33.4	0.133	3.38	1.049	0.0874	26.6	0.006 00	5.574 × 10 ⁻⁴
1 1/4	1.660	42.2	0.140	3.56	1.380	0.1150	35.1	0.010 39	9.653 × 10 ⁻⁴
1 1/2	1.900	48.3	0.145	3.68	1.610	0.1342	40.9	0.014 14	1.314 × 10 ⁻³
2	2.375	60.3	0.154	3.91	2.067	0.1723	52.5	0.023 33	2.168 × 10 ⁻³
2 1/2	2.875	73.0	0.203	5.16	2.469	0.2058	62.7	0.033 26	3.090 × 10 ⁻³
3	3.500	88.9	0.216	5.49	3.068	0.2557	77.9	0.051 32	4.768 × 10 ⁻³
3 1/2	4.000	101.6	0.226	5.74	3.548	0.2957	90.1	0.068 68	6.381 × 10 ⁻³
4	4.500	114.3	0.237	6.02	4.026	0.3355	102.3	0.088 40	8.213 × 10 ⁻³
5	5.563	141.3	0.258	6.55	5.047	0.4206	128.2	0.139 0	1.291 × 10 ⁻²
6	6.625	168.3	0.280	7.11	6.065	0.5054	154.1	0.200 6	1.864 × 10 ⁻²
8	8.625	219.1	0.322	8.18	7.981	0.6651	202.7	0.347 2	3.226 × 10 ⁻²
10	10.750	273.1	0.365	9.27	10.020	0.8350	254.5	0.547 9	5.090 × 10 ⁻²
12	12.750	323.9	0.406	10.31	11.938	0.9948	303.2	0.777 1	7.219 × 10 ⁻²
14	14.000	355.6	0.437	11.10	13.126	1.094	333.4	0.939 6	8.729 × 10 ⁻²
16	16.000	406.4	0.500	12.70	15.000	1.250	381.0	1.227	0.1140
18	18.000	457.2	0.562	14.27	16.876	1.406	428.7	1.553	0.1443
20	20.000	508.0	0.593	15.06	18.814	1.568	477.9	1.931	0.1794
24	24.000	609.6	0.687	17.45	22.626	1.886	574.7	2.792	0.2594

Fuente: (Mott, 2006)

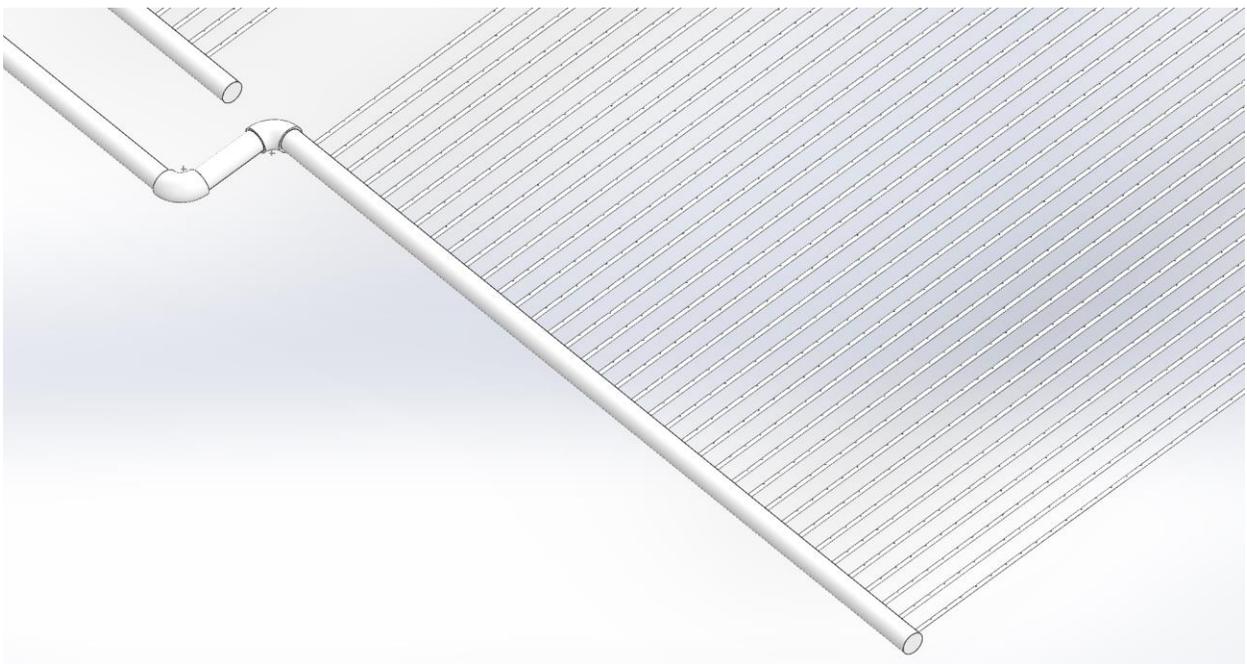
Anexo 3. Diseño de línea de descarga del sistema



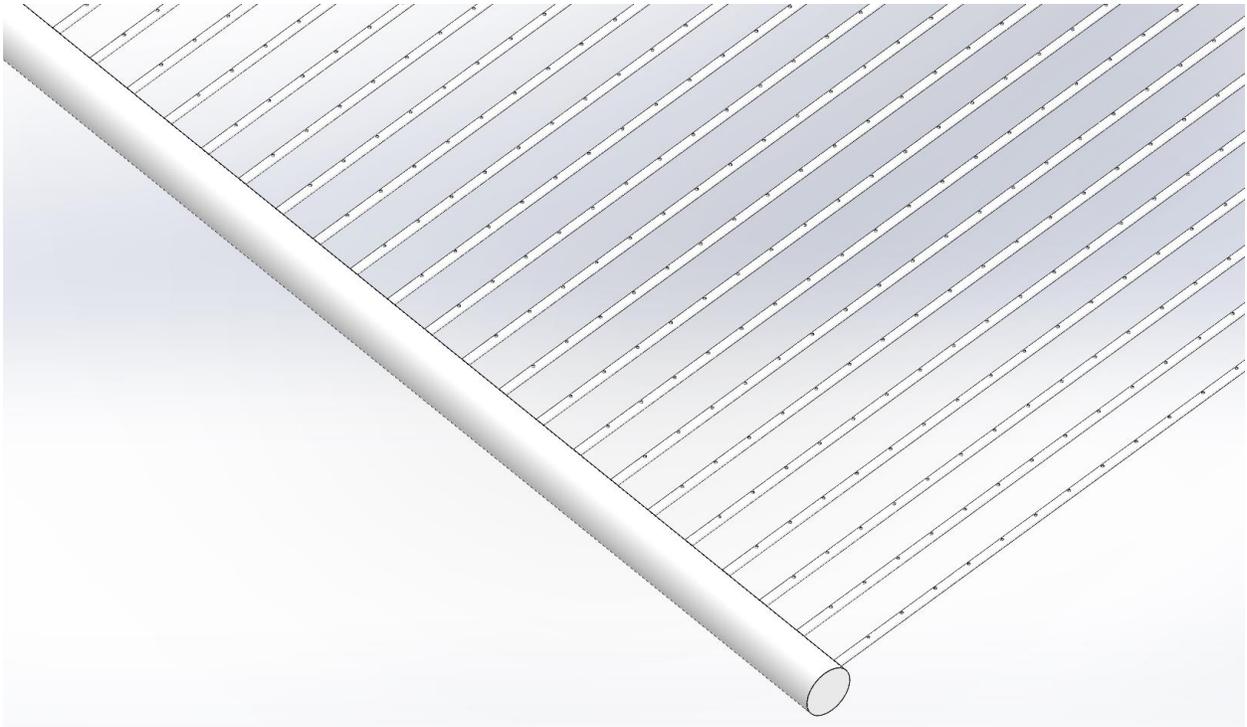
Fuente: Elaborado por el autor



Fuente: Elaborado por el autor



Fuente: Elaborado por el autor



Fuente: Elaborado por el autor

Anexo 4. Consigna de programación

Se necesita diseñar un sistema que controle la bomba principal del sistema, la bomba para la fertirrigación, la apertura y cierre de válvulas a lo largo de la finca, y el control de las electroválvulas para el retrolavado de los filtros de grava. Así mismo se necesita que se muestre en pantalla lectura de los sensores de humedad en campo y de los parámetros medidos por la estación meteorológica.

A considerar:

- La bomba principal deberá encenderse tres minutos después de haber energizado el sistema, el accionamiento también puede ser manual antes de cumplirse este tiempo.
- El fertirriego se comenzará de manera automática una vez hayan transcurrido 30 minutos de irrigación del sistema; esto para cada turno. (Esta acción se puede realizar de manera manual también, tanto el encendido como el apagado)
- El fertirriego finalizará 5 minutos después de haberse iniciado este proceso.

- La irrigación se puede realizar en el orden que el operario decida, no necesariamente se hará en el orden preestablecido de turnos según seccionamiento.

Anexo 5. Levantamiento de señales

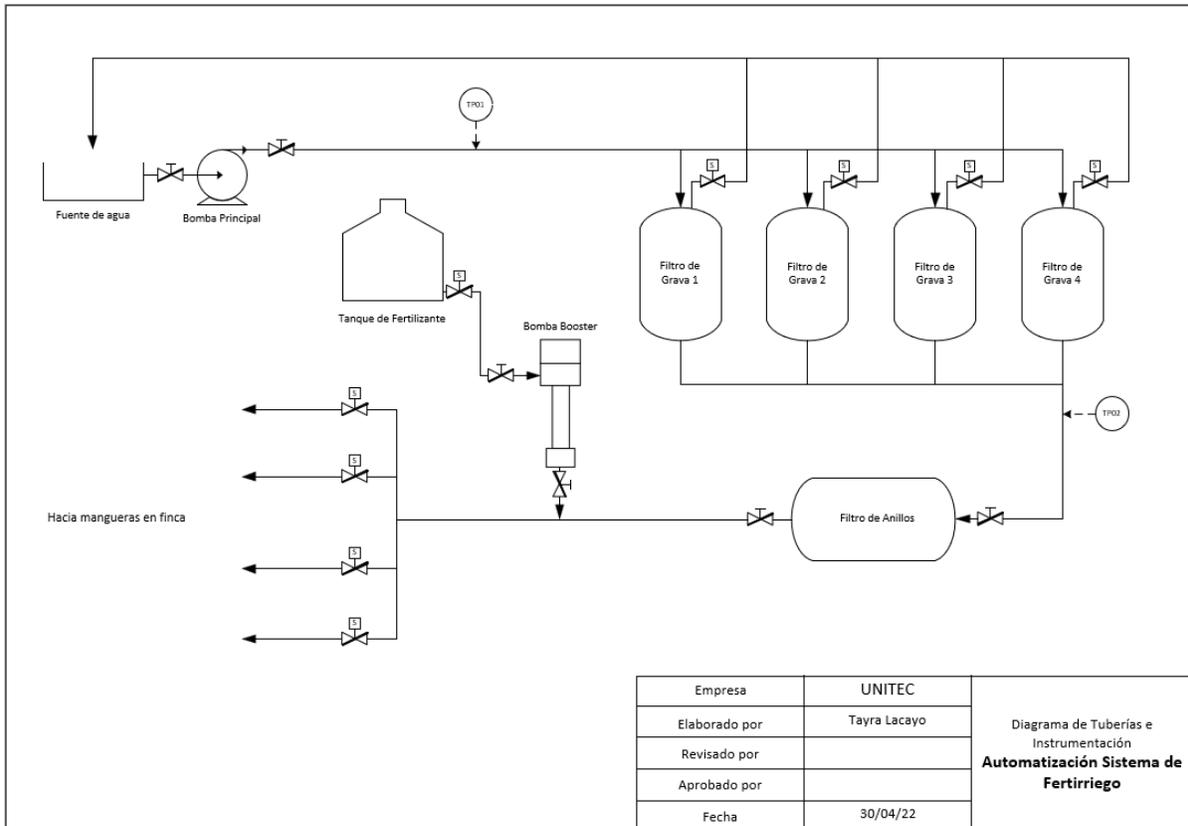
System Controller	Simulador PLC ABB	Revisión	2022
Cliente	UNITEC		
Proyecto	Sistema de Fertirriego por goteo		

MAESTRO			ESCLAVO			MODULO E/S
Módulo: PM564-TP-ETH			Módulo:			Módulo: PM564-TP-ETH Tipo: 6DI, 6DO-T, 2AI, 1AO
Canal	Señal	SPAN	Unidades	Tag	Descripción	Observaciones
DI 00	24Vdc	0/1		PE	Pulsador paro de emergencia	
DI 01	24Vdc	0/1				
DI 02	24Vdc	0/1				
DI 03	24Vdc	0/1				
DI 04	24Vdc	0/1				
DI 05	24Vdc	0/1				
DO 00	24Vdc	0/1		MB00	Motor de bomba centrífuga	
DO 01	24Vdc	0/1		MB01	Motor de bomba fertirriego	
DO 02	24Vdc	0/1		EV01	Electroválvula filtro 1	
DO 03	24Vdc	0/1		EV02	Electroválvula filtro 2	
DO 04	24Vdc	0/1		EV03	Electroválvula filtro 3	
DO 05	24Vdc	0/1		EV04	Electroválvula filtro 4	
AI 00	4...20mA/ 0...10V	4...20mA		TP01	Transmisor de presión línea de descarga	
AI 01	4...20mA/ 0...10V	4...20mA		TP02	Transmisor de presión después de los filtros	
AO 00	4...20mA/ 0...10V					

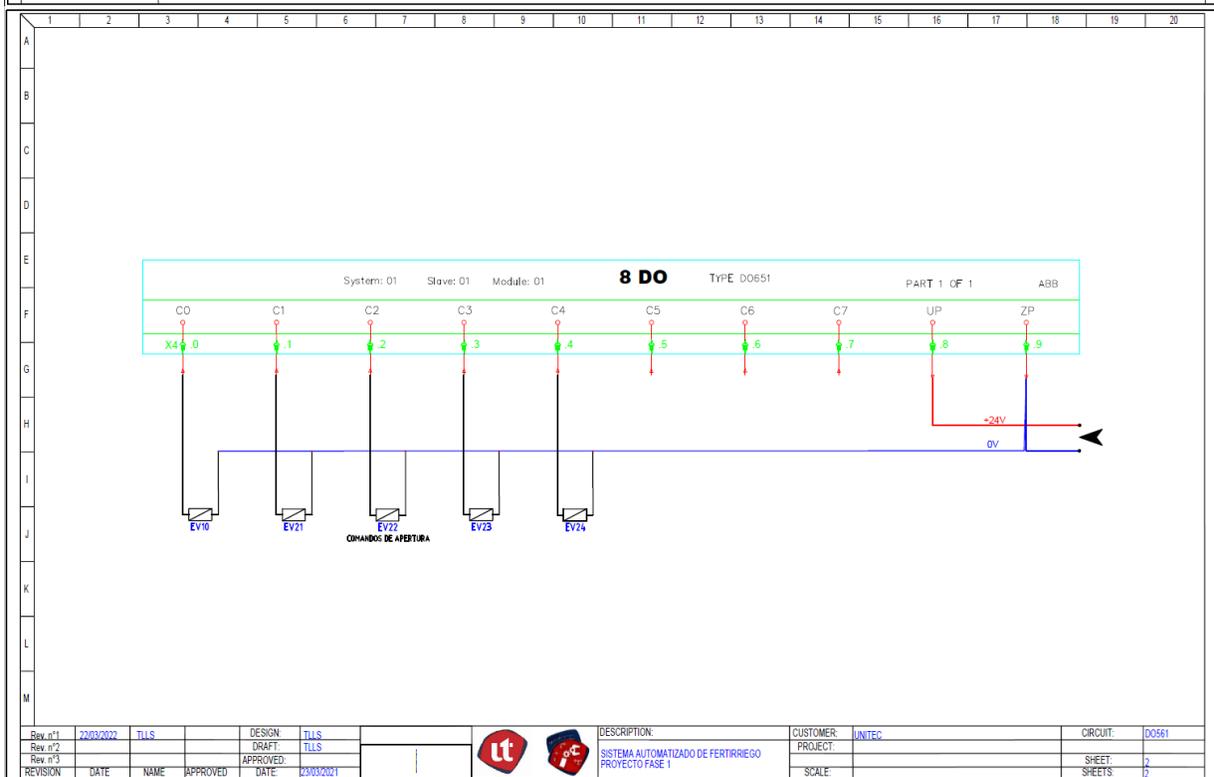
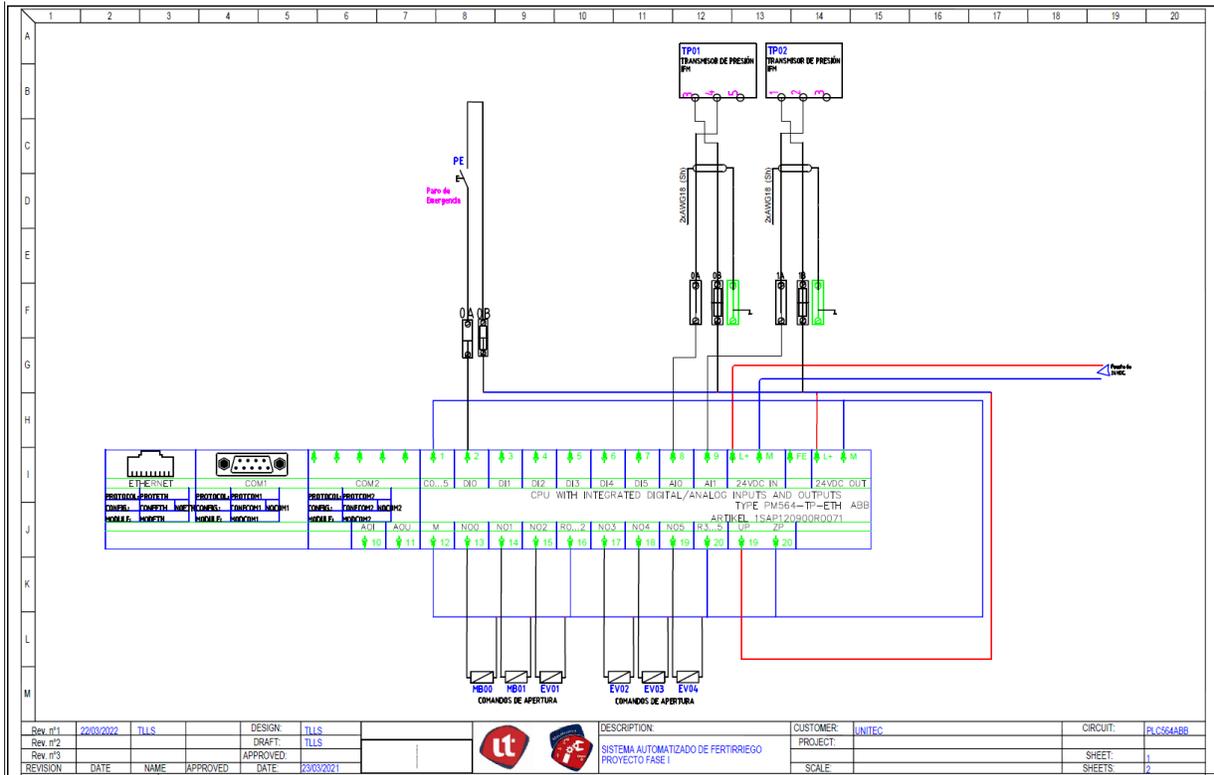
MAESTRO			ESCLAVO			MODULO E/S
Módulo: PM564-TP-ETH			Módulo: 1			Módulo: DO561 Tipo: 8DO
Canal	Señal	SPAN	Unidades	Tag	Descripción	Observaciones
DO 00	24Vdc	0/1		EV10	Electroválvula tanque fertirriego	
DO 01	24Vdc	0/1		EV11	Electroválvula bomba fertirriego	
DO 02	24Vdc	0/1		EV21	Electroválvula seccionamiento turno 1	
DO 03	24Vdc	0/1		EV22	Electroválvula seccionamiento turno 2	
DO 04	24Vdc	0/1		EV23	Electroválvula seccionamiento turno 3	
DO 05	24Vdc	0/1		EV24	Electroválvula seccionamiento turno 4	
DO 06	24Vdc	0/1				
DO 07	24Vdc	0/1				

Fuente: Elaborado por el autor

Anexo 6. Diagrama P&ID del Sistema de Fertirriego



Anexo 7. Diagramas de conexión PLC



Fuente: Elaborado por el autor

Anexo 8. Cotizaciones



Boton paro de emergencia rojo 1NC 40mm

Código de Producto: AUT.04.038
Código A: XB4BS8442
Marca: Schneider Electric

L 740.01

Schneider Electric

Precios no incluyen ISV.

AGREGAR AL CARRITO

COMPRAR AHORA

Fuente: (Equipos Industriales, 2022)



SENSOR DE HUMEDAD, TEMPERATURA Y CONDUCTIVIDAD DEL SUELO OXT-TR RS485

77 \$

Impuestos incluidos

Sensor de Humedad, Temperatura y Conductividad del Suelo OXT-TR RS485

Cantidad



AÑADIR AL CARRITO

Fuente: (C&D Tecnologia, 2022)

Artículo Item Code	Descripción Description	Cantidad Quantity	U.M. UOM	Precio Unit Unit Price	Total (USD) Total (USD)
➔ A0000159	Transceptor de radio 2400 MHz con RS-232, interfaz RS-485 de 2 hilos, ampliable con módulos de ampl	1.00	UNIDAD	USD 391.7300	391.73
2901541 - RAD-2400-IFS					
➔ A00023718	Módulo de ampliación de E/S - RAD-AI4-U-IFS - 2702290	1.00		USD 273.4900	273.49
Comodin - Comodin					
➔ A00023718	Convertidores DC/DC - MINI-PS- 12- 24DC/24DC/1 - 2866284	1.00		USD 113.6100	113.61
Comodin - Comodin					
➔ A00024651	Omnidireccional antenna, 2.4 GHz, 2 dBi, linear vertical, 1.5 m cable, RSMA (male), IP65, 50 Ω imped	1.00	UNIDAD	USD 127.5500	127.55
2701362 - RAD-ISM-2400-ANT-OMNI-2-1-RSMA					
➔ A00024350	Fuente de alimentación conmutada en primario UNO para montaje sobre carril, entrada: monofásica, sal	1.00	UNIDAD	USD 41.8000	41.80
2902991 - UNO-PS/1AC/24DC/ 30W					
➔ A00024978	Cable de antena, longitud 1 m; N (macho) -> RSMA (macho), impedancia 50 ohmios	1.00	UNIDAD	USD 48.7100	48.71
2903264 - RAD-PIG-RSMA/N-1					

Factor Cambiario del documento L. 24.25
 Precio Sujeto a Cambio de Dolar Americano

Contacto : Elsy Velasquez
E-Mail :
Celular:

Sub-total USD 996.89
I.S.V. / Tax USD 149.53
Total USD 1,146.42

Fuente: (Ramon & Dania Industrial S.R.L de C.V., 2022)

Home > Vantage Pro2, WeatherLink Live Bundle (no console)



Vantage Pro2, WeatherLink Live Bundle (no console)

BY DAVIS INSTRUMENTS

☆☆☆☆☆ No reviews

\$715.00

SKU 6112

Pay in 4 interest-free installments of \$178.75 with [shop Pay](#) [Learn more](#)

Version

US Metric

Quantity
1

ADD TO CART

Buy with Pay

[More payment options](#)

Get help buying. Call (800) 678-3669 (USA and Canada).

Customers in the USA and Canada only. International - [Find a reseller](#)

[Support documents](#)

Fuente: (Davis Instruments, 2022)



10SV13FC30

Goulds Pump
10SV13FC30 Liquid
End Only e-SV Series

\$2900.55

ADD TO CART

Fuente: (Pump Catalog, 2022)



Tubo PVC potable Amanco 8-plgx20 pies

L. 3,600.00

1

Añadir al carrito



Agregar a una lista

Código: 10060038
Marca: AMANCO

Disponible

Fuente: (Larach & Cía, 2022)



Tubo PVC Potable Amanco 8-plg x 20 pies

L. 2,100.00

1

Añadir al carrito

Agregar a una lista

Código: 10060001
Marca: AMANCO

Disponible

Fuente: (Larach & Cía, 2022)



Tubo PVC Potable Amanco Cedula.40 4-plg 6mts 220psi

L. 2,650.00

1

Añadir al carrito

Agregar a una lista

Código: 09320029
Marca: AMANCO

Disponible

Fuente: (Larach & Cía, 2022)



Tubo PVC Potable Amanco Cedula.40 2-plg 6mts 280psi

L. 840.00

1

Añadir al carrito

Agregar a una lista

Código: 09320027
Marca: AMANCO

Disponible

Fuente: (Larach & Cía, 2022)



Inicio / Construcción / Construcción / TINACO ROTOPLAS DE 2500 LITROS

TINACO ROTOPLAS DE 2500 LITROS

L9,794.01

Disponibilidad: 1 disponibles

COMPRAR

f t in

Fuente: (Ferretería Faraj, 2022)

Inicio / Fontanería / Grifos y Valvulas



Valvula Cheque Itap 2plg

L. 756.00 ~~L. 846.00~~

1

Añadir al carrito



Agregar a una lista

Codigo: 04140009

Marca: ITAP

Disponible

Fuente: (Larach & Cía, 2022)



COMERCIALIZADORA DE PRODUCTOS
AGROINDUSTRIALES S.A. DE C.V.

COMPASA
Col. Valle de Sula No.2, 27 Calle, 20 Ave, S.E. 2do. Anillo
San Pedro Sula 504 Cortes
Honduras
RTN: 05019002059230

CONSUMIDOR FINAL
San Pedro Sula

Honduras
RTN: 99999999999999

Cotización # SO57971

Fecha Cotización : 15/03/2022 14:23:50	Vendedor: Jorge Lopez	Plazo de pago: Pago inmediato
---	--------------------------	----------------------------------

DESCRIPCIÓN	CANTIDAD	PRECIO DE UNIDAD	DESC.(%)	DISC.LPS	PRECIO.DISC	IMPUESTOS	IMPORTE
[751091] TUBO INOX CED-40 2"	1.000 Unidad(es)	5,744.0101	7.0000	L 402.08	L 5,341.93	ISV 15%	L 5,341.93
[751089] TUBO INOX CED-40 10"	1.000 Unidad(es)	41,004.2056	7.0000	L 2,870.29	L 38,133.91	ISV 15%	L 38,133.91
[751095] TUBO INOX CED-40 8"	1.000 Unidad(es)	43,072.3657	7.0000	L 3,015.07	L 40,057.30	ISV 15%	L 40,057.30

Subtotal	L 83,533.14
Your Company	L 12,529.98
Total	L 96,063.12

Cotización valida por 15 días.
Cantidades pueden variar en los próximos días.

Pago inmediato

Tel.: 2510-2877 / 2580-1966 / 1969 Correo: info@compasa.com Web: http://www.compasahn.com RTN: 05019002059230

Cta. # 2100135801 Atlantida Cheques / Cta. # 200000025247 Ficohsa Cheques

Página: 1/1

Fuente: (COMPASA, 2022)

