Universidad Nacional de Ingeniería

Área de Conocimiento de Tecnología de la Información y Comunicación

Documentación del sistema de control automatizado para riego en plantaciones de caña de azúcar en la zona occidental de Nicaragua

Trabajo Monográfico para optar al título de Ingeniero en Electrónica

Elaborado por:

Br. Luis Donaldo Largaespada Silva
Carnet: 2013-61193

Br. Ezequiel Josúe Flores González
Carnet: 2013-61973

Br. Christie Guadalupe Reyes Muñoz
Carnet : 2013-61563

Tutor:

Ing. Natalia Azucena Gutiérrez Robleto

27 de abril de 2026
Managua, Nicaragua

Resumen

El documento presenta la estructuración completa del diseño de un sistema de control automatizado para el riego en plantaciones de caña de azúcar ubicadas en la zona occidental de Nicaragua. El proyecto surge ante la necesidad de optimizar el uso del recurso hídrico en un cultivo altamente demandante de agua, donde los sistemas tradicionales operan con maniobras manuales, baja precisión y sin retroalimentación de datos. Estas limitaciones generan pérdidas de agua, sobrecarga mecánica en bombas y baja uniformidad en la aplicación del riego.

Se analizan investigaciones nacionales e internacionales que han desarrollado soluciones parciales, ya sea mediante microcontroladores, IoT o riegos automatizados básicos. Sin embargo, estas propuestas no integran completamente la medición de variables críticas del proceso ni emplean controladores industriales capaces de garantizar estabilidad, precisión y seguridad operativa. Por ello, el presente estudio propone un enfoque integral basado en automatización industrial, instrumentación estandarizada y metodologías formales de control.

El marco teórico profundiza en la fisiología del cultivo, destacando cómo sus requerimientos hídricos varían según las etapas fenológicas. Se explica también la ingeniería del riego, los métodos disponibles, los indicadores de eficiencia y la importancia de variables como presión, caudal, humedad y nivel de la fuente. En el área de automatización se detallan los componentes, lenguajes de programación y arquitectura de los PLC, así como el papel de los actuadores y la aplicación de estrategias de control en lazo abierto, cerrado y secuencial.

La metodología de desarrollo se estructura en fases que incluyen el análisis del problema, selección de sensores y actuadores, diseño de arquitectura, programación de la lógica de control, simulación teórica y validación mediante pruebas unitarias e integración en campo. Se definen las variables críticas del proceso, las especificaciones técnicas de los sensores industriales recomendados y la estructura general del sistema de control, que opera con modos manual, automático y mantenimiento.

La lógica del sistema incorpora escalado y normalización de señales, secuencias seguras de arranque y paro, rutinas de supervisión basadas en condiciones hidráulicas, gestión de alarmas y registro de eventos. Todo esto garantiza una operación eficiente, segura y trazable, evitando fallas como funcionamiento en seco, sobrepresión o caídas de nivel.

Las conclusiones indican que la automatización mediante PLC y sensores industriales es una solución viable para mejorar la eficiencia hídrica, energética y operativa del riego. Se destaca que la integración de controladores, transmisores de presión y caudal, y sistemas de protección permite mejorar la uniformidad del riego y reducir el riesgo de fallas mecánicas. Se recomienda avanzar hacia una implementación física en campo, emplear hardware de grado industrial con gabinetes NEMA 4X y capacitar al personal operativo para garantizar la sostenibilidad del sistema.

Índice

I. Introducción 1

II. Antecedentes 3

III. Objetivos 5

3.1. General 5

3.2. Especifico 5

IV. Marco Teórico 6

4.1 Fundamentos de la Agricultura y los Recursos Hídricos 6

4.1.1 Cultivo de Caña de Azúcar 6

4.1.2 Fases del crecimiento de la caña de azúcar 6

4.1.3 Requerimientos Hídricos. 6

4.1.4 Ingeniería de Riego 8

4.1.5 Dimensión de consumo 8

4.1.6 Monitoreo de Parámetros 10

4.2 Tecnología de Automatización y Control 10

4.2.1 Controlador Lógico Programable (PLC) 10

4.2.2 Arquitectura y Componentes del PLC 12

4.2.3 Lenguajes de Programación 13

4.2.4 Elementos de accionamiento 17

4.3 Aplicación en Sistemas de Riego 19

4.4 Teoría de Control Aplicada al Riego 20

4.4.1 Sistemas de Control 20

4.4.2 Lazo Abierto 20

4.4.3 Lazo Cerrado 21

4.4.4 Control Secuencial 22

4.4.5 Tipos de sistemas de control 22

4.4.6 Tipos de sintonización 23

4.1.5.2 Método de Ziegler-Nichols en lazo cerrado 23

4.1.5.3 Método de Cohen-Coon 23

4.1.5.4 Sintonización por Software 23
V. Metodología del Proyecto 24
5.1. Enfoque de investigación 24
5.2. Diseño de Proyecto 24
5.3. Técnicas y métodos 24
5.4. Materiales y recursos 25
5.5. Procedimientos 25
5.5.1. Fase 1: Análisis del Problema y Levantamiento de Requerimientos 25
5.5.2 Fase 2: Diseño del Sistema de Control Automatizado 26
5.5.3 Fase 3: Programación y Desarrollo de la Lógica de Control 29
5.5.4 Fase 4: Integración, Pruebas en Campo y Validación 30
VI. Desarrollo del Proyecto 31
6.1. Descripción de la operación de riego 31
6.2. Dinámica operativa 31
6.2.1. Descripción Sistema de riego existente 31
6.2.2. Identificación de variables críticas 32
6.2.3. Selección de instrumentación 34
6.3. Diseño y arquitectura y lógica del sistema 34
6.3.1. Arquitectura general del sistema 34
6.3.2. Selección técnica del hardware 36
6.3.3. Sensores y actuadores 36
6.4. Desarrollo de la lógica de control 39
6.4.1. Tratamiento de señales 39
6.4.1.3. Programación 42
6.4.1.3.1. Segmento 1 ciclo de arranque 42
6.4.1.3.2. Segmento 2 Tratamiento de señal 42
6.4.1.3.3. Segmento 3 direccionamiento 43
6.4.1.3.4. Segmento 4 Sintonización 43
6.4.2. Modo de funcionamiento 45
6.4.3. Secuencia de arranque 45

VII. Conclusiones 47
VIII. Recomendaciones 48
IX. Referencias Bibliográficas 49
XI. Anexos 51
A. Anexo 1 51
B. Anexo 2 51
C. Anexo 3 52
D. Anexo 4 52
E. Anexo 5 53
F. Anexo 6 53
G. Anexo 7 53
H. Anexo 8 54
I. Anexo 9 55
J. Anexo 10 56
K. Anexo 11 57
L. Anexo 12 57

I. Introducción

La gestión eficiente del recurso hídrico constituye uno de los desafíos más relevantes de la agroindustria moderna, particularmente en cultivos de alta demanda de agua, como la caña de azúcar. En regiones con marcada variabilidad climática y presión sobre las fuentes hídricas, el uso ineficiente del agua no solo incrementa los costos operativos y energéticos, sino que también compromete la sostenibilidad ambiental y la productividad agrícola a largo plazo. En este contexto, los sistemas de riego mecanizado a gran escala, aunque fundamentales para garantizar la producción, presentan limitaciones cuando operan bajo esquemas de control tradicionales basados en maniobras manuales o temporizaciones fijas, lo que dificulta garantizar aplicaciones de riego precisas y homogéneas.

En Nicaragua, especialmente en la zona occidental del país, la producción de caña de azúcar depende de sistemas de extracción y distribución de agua que, en muchos casos, carecen de automatización y monitoreo adecuados. Esto limita el control eficiente de variables críticas como caudal, presión, nivel de agua y humedad del suelo, generando pérdidas de agua, sobreexigencia de equipos de bombeo y dificultades para responder ante condiciones de falla o variaciones operativas. Debido a estas limitaciones, se vuelve necesario adoptar tecnologías que permitan mejorar la eficiencia y estabilidad del proceso de riego.

Ante esta problemática, la incorporación de tecnologías de automatización industrial y control electrónico surge como una alternativa viable para optimizar la gestión hídrica en la agroindustria. El uso de controladores como unidad central, integrados con sensores y actuadores adecuados, posibilita la implementación de esquemas de control avanzados capaces de regular con precisión las variables del proceso, mejorar la uniformidad del riego y proteger la infraestructura hidráulica. Asimismo, la aplicación de estrategias de control en lazo cerrado y control secuencial permite una respuesta automática y confiable ante cambios en las condiciones operativas, reduciendo la intervención humana y los errores asociados al manejo manual.

Este documento se estructura de la siguiente manera: el capítulo 2 presenta los antecedentes y trabajos previos que fundamentan la necesidad de automatizar los

sistemas de riego. El capítulo 3 expone los objetivos generales y específicos de la investigación. El capítulo 4 desarrolla el marco teórico, incluyendo conceptos de ingeniería de riego, automatización industrial, controladores, sensores, actuadores y teorías de control aplicadas. El capítulo 5 describe el tipo de investigación, la metodología empleada y las fases definidas para el desarrollo del proyecto. En el capítulo 6 se presenta el desarrollo técnico del sistema, identificando variables críticas, seleccionando hardware, estructurando el flujo lógico de control y estableciendo las condiciones de operación del sistema de riego automatizado. Finalmente, los capítulos 7 y 8 contienen las conclusiones y recomendaciones resultantes del estudio, con el propósito de orientar futuras implementaciones y servir como referencia para investigaciones posteriores en el ámbito de la automatización agrícola.

El presente proyecto tiene como propósito documentar el diseño de un sistema de control automatizado aplicado al riego en plantaciones de caña de azúcar, centrado en un esquema de extracción y distribución de agua operado mediante un PLC. La propuesta abarca el análisis de los requerimientos operativos, la selección de instrumentación, el diseño de la arquitectura de control, la elaboración de la lógica de funcionamiento, los mecanismos de seguridad y la gestión de alarmas, todo bajo criterios técnicos y normativos que garanticen eficiencia y sostenibilidad

II. Antecedentes

A nivel internacional existen algunas investigaciones que tratan el diseño de sistemas de riego y su gestión para diversos tipos de cultivo:

- Shubhangi y Shripad (2019) diseñan un sistema automatizado para el riego de caña de azúcar utilizando microcontrolador Arduino en una granja de la India, donde implementan un sistema interactivo de respuesta de voz para el encendido y el apagado de la bomba a través de llamadas por teléfono celular. Sin embargo, el proyecto se enfoca en el desarrollo del sistema de reconocimiento de voz, y en lo que respecta al control de la bomba, solo implementan un controlador ON/OFF, sin el control de tiempos de riego ni cantidad de agua irrigada.
- Wang et. al. (2020) desarrollan un sistema de irrigación de lazo cerrado para una granja de caña de azúcar en Australia utilizando en Internet de las Cosas (Internet of Things, IoT), pero más que el diseño en sí de un sistema de riego, abordan la integración de uno ya existente con una herramienta web que les permite el monitoreo del riego de manera remota, así como la cantidad de agua irrigada de acuerdo con las necesidades de las plantaciones.

Ambos estudios presentan algunas herramientas que pueden ser útiles para la gestión de los sistemas de riego, pero no abordan de manera técnica el diseño del sistema en sí, así como el análisis de los elementos controladores y accionadores ideales para un riego preciso.

A nivel regional, en El Salvador, Amaya (2015) implementa un Sistema de Riego Automatizado en un Invernadero de la Escuela Nacional de Agricultura, donde a manera didáctica realiza la programación del riego para que se realice de manera automática o manual, sin embargo, carece de sensores que permitan monitorear al estado de los cultivos y controlar de manera eficiente el riego.

En México, Porras (2011) y Gavi-Reyes et al. (2017) ya estudian el diseño de sistemas de riego por pivote central de precisión, controlados electrónicamente, y programables para ser utilizados en diversos tipos de cultivos y tipos de suelo.

En nuestro país, podemos encontrar investigaciones sobre diseños de sistemas de riego:

- Rivas y Tijerino (2012) diseñan un Sistema de Riego por Aspersión Convencional para cultivo de maíz en el Departamento de Masaya, pero en lo que respecta al control del riego, se limitan a seleccionar un tipo de bomba y los aspersores a utilizar.
- Un trabajo similar realiza Moran et al. (2023), que diseñan un sistema de riego por goteo y aspersión semi móvil para cultivos de caña de azúcar en el Departamento de Chinandega.

Ambas investigaciones realizadas en la Universidad Nacional de Ingeniería tienen la limitación en que solamente controlan el paro y arranque del sistema, dejando de lado el monitoreo de las variables de humedad en el suelo del cultivo.

Estos trabajos de investigación muestran cómo está el avance en el diseño de sistemas de riego en nuestro país, lo que indica que se debe seguir investigando y desarrollando, para obtener sistemas más eficientes en lo que a consumo de agua se refiere.

Con base en lo anteriormente descrito, el presente proyecto toma como referencia estas investigaciones para proponer la documentación de un esquema de control de riego automatizado en cultivo de caña de azúcar, que pueda ser flexible en su programación y sea útil también en otras aplicaciones y distintos tipos de cultivos, prestándole importancia a la eficiencia del recurso hídrico, que tan vital es para nuestro país, utilizando los dispositivos de instrumentación, control y accionamiento más idóneos para esta tarea.

III. Objetivos

3.1. General

- Documentar el esquema de control automatizado de los procesos de adquisición, procesamiento y actuación, para lograr la gestión eficiente del riego en un sistema de extracción de agua para riego en plantaciones de caña de azúcar ubicadas en la zona occidental de Nicaragua.

3.2. Especifico

- Analizar los elementos de medición (caudal, presión, nivel de agua) y actuadores más adecuados para el entorno agrícola, de acuerdo con sus rangos, precisión y utilidad para el riego eficiente.
- Proponer el esquema de interconexión entre los sensores, los módulos de entrada analógica/digital, y actuadores del controlador.
- Establecer el diagrama de flujo y la estructura del programa de control de acuerdo con la relación entre las entradas y salidas del controlador.

IV. Marco Teórico

4.1 Fundamentos de la Agricultura y los Recursos Hídricos

4.1.1 Cultivo de Caña de Azúcar

La caña de azúcar (Saccharum officinarum) es un cultivo que requiere una alta cantidad de radiación solar y de agua para acumular sacarosa de manera óptima (Salazar & López, 2017). Su manejo adecuado del riego es crucial para maximizar el rendimiento y, por consiguiente, la concentración de azúcar en el tallo.

4.1.2 Fases del crecimiento de la caña de azúcar

El ciclo de crecimiento se divide en fases fenológicas con distintos requerimientos hídricos, influyendo directamente en la calidad para la molienda (INCAE, 2020):

- Germinación y Establecimiento (0-60 días): Requiere humedad constante para asegurar una población uniforme de plantas, base de la producción futura de azúcar.
- Macollamiento (60-120 días): Período de crecimiento vegetativo rápido. El déficit hídrico en esta etapa es crítico, ya que impacta negativamente en el número final de tallos que serán destinados a la molienda.
- Máximo Crecimiento o Gran Crecimiento (120-270 días): La planta alcanza su máxima altura de tallos y producción de azúcares. Aquí se registra el pico de la demanda hídrica necesaria para el desarrollo óptimo del volumen del tallo.
- Maduración y Cosecha (270 días en adelante): El crecimiento se detiene y la planta comienza a acumular sacarosa en los tallos. Es esencial aplicar un déficit hídrico controlado para inducir estrés, práctica que favorece la acumulación máxima de azúcar, elevando la calidad para el procesamiento azucarero (Crespo et al., 2019).

4.1.3 Requerimientos Hídricos.

El ciclo de vida de la caña de azúcar presenta una demanda hídrica dinámica, donde la sensibilidad y el estrés de agua varían según el desarrollo de la planta. Para efectos de automatización y gestión de recursos, el ciclo se divide en cuatro fases

principales, cada una con un objetivo fisiológico distinto que debe ser satisfecho por el sistema de riego.

- **Fase de Germinación y Emergencia**

La demanda de agua es moderada, pero la sensibilidad a la sequía es alta. Un suelo seco impide el brote de las yemas, mientras que un exceso de agua puede provocar la pudrición del material vegetativo por falta de oxígeno.

Función del Riego: Mantener un estado de humedad constante que facilite la activación enzimática de la semilla y el desarrollo de las raíces primarias.

- **Fase de Macollamiento**

El consumo de agua aumenta progresivamente a medida que el follaje se expande y cubre el suelo. La planta requiere un suministro estable para sostener el crecimiento de los nuevos brotes.

Función del riego: evitar el cierre de las estomas (poros en las hojas) para no detener la fotosíntesis. El estrés hídrico en esta etapa reduce drásticamente el número final de tallos aprovechables para la cosecha.

- **Fase de Gran Crecimiento (Elongación)**

Debido al gran volumen de biomasa y a la amplia superficie foliar, la planta transpira volúmenes considerables de agua. Cualquier déficit, por pequeño que sea, detiene la elongación de los entrenudos, lo que se traduce directamente en una pérdida de peso y rendimiento industrial.

Función del Riego: Suministrar el máximo volumen de agua permitido por la capacidad del suelo para garantizar que la planta alcance su potencial genético de crecimiento.

- **Fase de Maduración y Acumulación de Sacarosa**

La planta debe transitar de un estado de crecimiento activo a uno de almacenamiento. Para que esto ocurra, se requiere una disminución gradual de la

disponibilidad de agua, la cual induce a la planta a concentrar los azúcares (sacarosa) en el tallo en lugar de utilizarlos para formar nuevas hojas o tejidos.

Función del Riego: El sistema debe aplicar un "agostamiento" o retiro controlado del agua. Un riego excesivo en esta etapa es perjudicial, ya que sobre estimula el crecimiento de nuevos brotes verdes que consumen el azúcar ya almacenado.

4.1.4 Ingeniería de Riego

4.1.4.1 Métodos de Riego Agrícola

Los principales métodos de riego son:

- **Riego por Superficie (Gravedad):** Baja eficiencia por grandes pérdidas.
- **Riego por aspersión:** El agua se rocía sobre el cultivo. Incluye el sistema de riego circular mecanizado (Cañón & Restrepo, 2021).
- **Riego localizado:** (goteo, microaspersión). Aplica el agua directamente a la zona radicular, ofreciendo la mayor eficiencia (Tarjuelo, 2005).

4.1.4.2 Eficiencia y Uniformidad del Riego

La calidad de un sistema de riego mecanizado se evalúa mediante indicadores que el control electrónico busca optimizar: Eficiencia de Aplicación (Ea): Mide la proporción de agua aplicada que se retiene en la zona radicular y se utiliza por el cultivo.

Coeficiente de Uniformidad (CU) de Christiansen: es la métrica clave. Indica cuán homogéneamente se distribuye el agua. Un CU superior al 85% es deseable. El control automatizado de caudal y velocidad en el sistema de riego circular busca maximizar este coeficiente (Cañón & Restrepo, 2021).

4.1.5 Dimensión de consumo

En el occidente del país existen dos grandes industrias azucarera que tienen grandes extensiones de tierra. Su ubicación estratégica les permite acceder a fuentes hídricas cercanas como ríos, salidas al mar y fuentes hídricas en el subsuelo. Esto les ayuda a responder a la demanda de consumo en los meses más

secos (Octubre – mayo), por tal razón su extracción y distribución depende de equipos de bombeo controlados por zonas y en ventanas de tiempo.

	Plantación	Producción	Consumo de agua
Ingenio Monte Rosa	12,000 hectárea	2,765,188 Toneladas	12000 m3/hectárea
Ingenio San Antonio	16,000 hectárea	2,985,782 Toneladas	16000 m3/hectárea

El consumo promedio de agua para el cultivo de caña de azúcar es relativamente alto y según el clima, el tipo de suelo, la duración del ciclo de lluvia y periodos secos. Por norma general el consumo promedio por ciclo es de 1,200mm a 1,600 mm de agua por ciclo de 10 a 12 meses. La caña de azúcar tiene elevados requerimientos hídricos: la construcción de un gramo de materia seca de tallo para la molienda requiere aproximadamente 0,5 litros de agua y esa misma cantidad de agua se necesita para acumular entre 0,25 g a 0,40 g de sacarosa. la concentración de las lluvias durante el verano coincidente con la fase de gran crecimiento del cañaveral permite que, en años normales, las lluvias prácticamente satisfagan los requerimientos hídricos de esta fenofase.

Las diferentes fases fenológicas del cultivo (emergencia, macollaje, gran crecimiento y maduración) tienen diferentes requerimientos hídricos. La fase de mayor exigencia en disponibilidad hídrica es la de gran crecimiento (diciembre a marzo), ya que en esta se define el rendimiento cultural, o sea la producción de caña por unidad de superficie. En esta fase, se consume cerca del 60% del total de agua que necesita el cultivo; bajo requerimiento hídrico durante esta fenofase se traducen en pérdidas significativas de producción. Es por eso por lo que disponer de un sistema de riego evita que el cultivo de la caña de azúcar se vea sometido a situaciones de estrés en años en que la distribución y/o la cantidad de las precipitaciones no son normales.

4.1.6 Monitoreo de Parámetros

4.1.6.1 Medición de la humedad del suelo

Permite al sistema de control tomar la decisión de iniciar o detener el riego (punto de agotamiento). Los sensores capacitivos miden la constante dieléctrica del suelo, el cual está relacionada con su contenido de agua, facilitando su integración electrónica (Crespo et al., 2019).

4.1.5.2 Medición de Caudal, Presión y Nivel

Estas variables son críticas para el control del caudal y la velocidad:

- **Transductores de presión:** convierten la presión en la línea en una **señal eléctrica estándar** (4-20 mA). Esta señal es la entrada fundamental para el **lazo de control PID**, asegurando la presión constante requerida en los aspersores (Martínez & Poveda, 2018).
- **Medidores de caudal (Flujo):** Miden el volumen de agua por unidad de tiempo. Deben generar una señal de pulso o analógica precisa para que el sistema de control calcule el volumen total aplicado, dato crucial para la gestión hídrica (Cañón & Restrepo, 2021).
- **Sensores de nivel:** son esenciales para la **supervisión y protección** de la fuente de agua (pozos, reservorios o tanques de succión). El sistema de control utiliza esta medición para evitar que la bomba principal opere en seco, lo que podría provocar fallas catastróficas. Los sensores pueden ser de tipo **ultrasónico** (para reservorios) o **de flotador/presión** (para pozos), y su señal de salida también debe ser acondicionada a un formato compatible con las entradas analógicas o digitales del PLC.

4.2 Tecnología de Automatización y Control

4.2.1 Controlador Lógico Programable (PLC)

Los controladores lógicos programables (Programmable logic controllers, PLC) son dispositivos digitales basados en microprocesador, capaces de emular el

comportamiento de un diagrama de escalera eléctrico, para controlar diversos tipos de equipos industriales y sistemas automatizados completos. Los PLC suelen ser un componente fundamental de los sistemas automáticos industriales, muy eficientes y fiables en aplicaciones que implican control secuencial y sincronización de procesos en distintas industrias. De igual manera, reducen el coste de los sistemas de control avanzados y complejos. (Namekar & Yadav, 2020)

Bolton (2015) define el PLC como una forma especial de controlador basado en microprocesador, que utiliza una memoria programable para almacenar instrucciones lógicas, secuenciación, temporización, conteo y operaciones aritméticas para control de máquinas y procesos, a través de módulos de entrada/salida (Anexo 1).

Generalmente, un PLC está equipado con un sistema operativo que permite cargar y ejecutar programas y que realiza autoverificaciones. Los programas para PLC se desarrollan y compilan en dispositivos externos, y estos se ejecutan en el controlador en un bucle permanente. En cada ciclo del bucle, comúnmente llamado ciclo de escaneo, se leen las entradas, el programa calcula un nuevo estado interno, y las salidas se actualizan (Anexo 2). Este comportamiento cíclico hace que los PLC sean adecuados para tareas de control e interacción con un entorno continuo (Mader, 2000).

La clasificación más frecuente de los PLC es la siguiente:

- PLC Fijo/Integrado/Compacto: Tienen un número fijo de entradas y salidas integradas en el dispositivo, y normalmente no pueden ser incrementadas. Esta es una característica común de muchos mini PLC.
- PLC Modular: Consiste en múltiples módulos que pueden ser agregados o quitados del sistema. Esto hace a los PLC escalables, permitiendo cubrir múltiples requerimientos. (Empowered Automation Solutions Inc., 2023)

4.2.2 Arquitectura y Componentes del PLC

Según Bolton (2015), la estructura interna de un PLC consta de los siguientes componentes (Anexo 3):

- La unidad central de procesamiento (CPU), que contiene el microprocesador, donde se interpretan las señales de entrada y se llevan a cabo las acciones correspondientes según el programa almacenado en su memoria, y traslada dichas acciones a las salidas.
- La fuente de alimentación, que convierte el voltaje de entrada AC al bajo voltaje DC necesario para el procesador y los circuitos de los módulos de entrada y salida.
- El dispositivo de programación, normalmente externo, es utilizado para grabar el programa de control en la memoria del PLC.
- La Unidad de Memoria, donde se almacenan tanto el programa de control, como los datos recibidos de los módulos de entrada y salida.
- Los Módulos de Entrada y Salida (I/O), donde el procesador recibe y envía información desde y hacia dispositivos externos. Las entradas pueden ser de interruptores u otros tipos de sensores, como fotoeléctricos, inductivos, mecánicos, de temperatura, etc. Las salidas pueden ser bobinas de motores de arranque, contactores, válvulas solenoides, etc. Las entradas y salidas pueden ser discretas, digitales o analógicas (Anexo 4).
- La interfaz de comunicación, utilizada para transmitir y recibir información a través de redes de comunicación desde y hacia otros PLC remotos.

4.2.3 Lenguajes de Programación

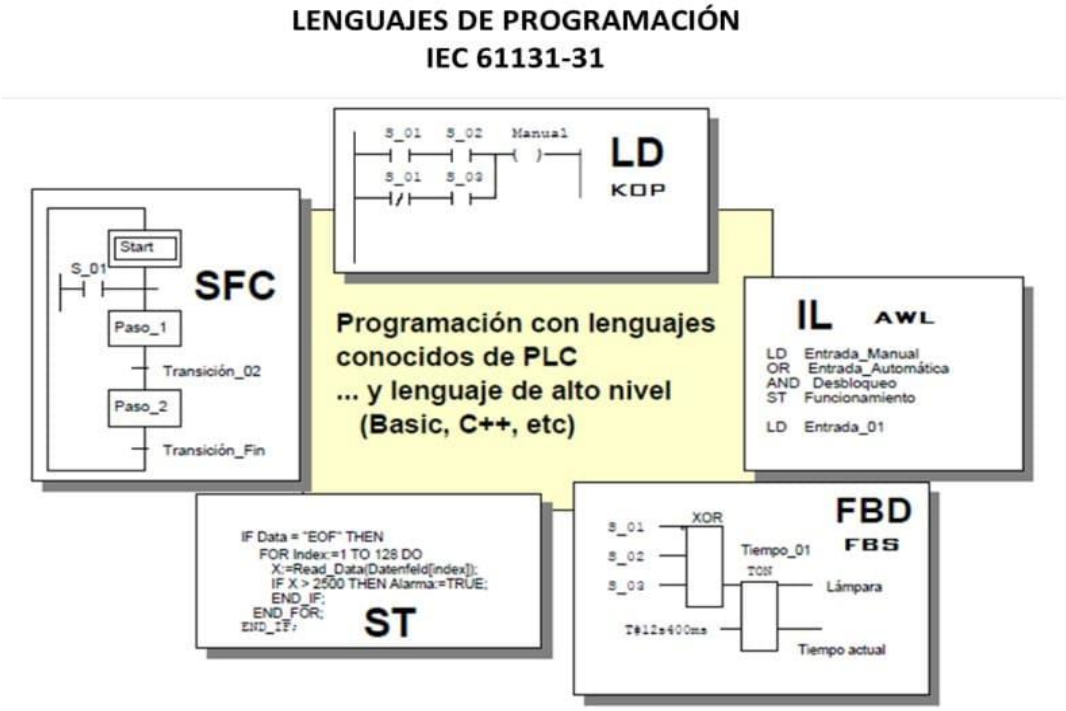


Ilustración 1 Lenguajes de Programación

Actualmente, los fabricantes de PLC se basan en el Estándar Internacional IEC 61131-3, donde se definen las características de los lenguajes de programación para controladores programables, lo que permite la portabilidad de software, reduce costos y facilita el desarrollo de sistemas de control industrial.

Podemos clasificar los lenguajes de programación para PLC en dos tipos (Anexo 5):

- **Visuales:** admiten estructurar el programa por medio de símbolos gráficos, similares a los que se han utilizado para describir los sistemas de automatización, planos esquemáticos y diagramas de bloques. Entre estos se encuentran el Diagrama de Contactos o “Ladder” (LD), el Diagrama de Bloques Funcionales (FBD), y el Diagrama de Funciones Secuenciales (SFC).

- **Escritos:** son listas de sentencias que describen las funciones a ejecutar. Entre estos se encuentran la Lista de Instrucciones (IL), y el lenguaje de Texto Estructurado (ST).
- **Diagrama de Contactos (LD)**

El diagrama de contactos, también conocido como diagrama de escalera, está basado en diagramas de circuitos de lógica de relés. Consiste en dos barras paralelas conectadas por una serie de peldaños, con una apariencia similar a una escalera (de ahí su nombre). Estos peldaños contienen contactos y bobinas que simbolizan entradas (como el valor de un sensor) y salidas (como la orden de arranque de un motor), respectivamente.

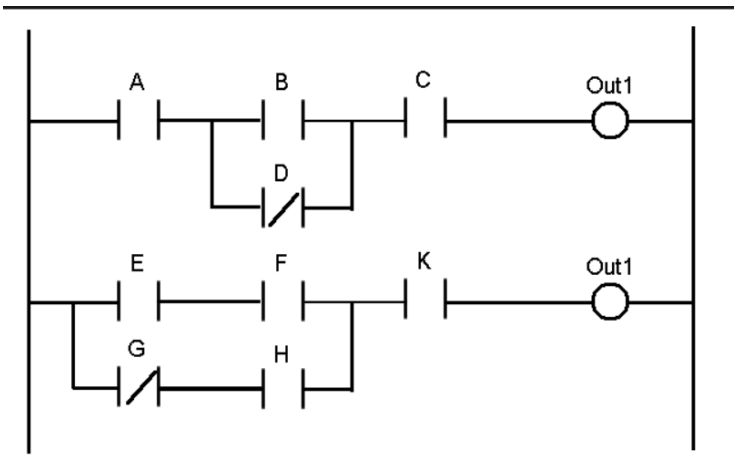


Ilustración 2 Diagrama de Contactos

Es un lenguaje flexible, versátil, simple para resolver problemas y fácil de aprender. Sin embargo, una desventaja es que, una vez que una escalera alcanza cierto número de peldaños, puede volverse difícil de manejar y es necesario dividirla en varias para facilitar su mantenimiento.

Las máquinas de estados, el control PID y los sistemas con abundante álgebra booleana son algunos casos de uso que se adaptan bien a la lógica de escalera.

- **Diagrama de Bloques de Función (FBD)**

El diagrama de bloques de función es otro lenguaje gráfico de programación de PLC muy popular. Consiste en varios tipos de bloques con entradas y salidas. Los

dispositivos conectados al PLC pueden vincularse a una entrada y las variables pueden enviarse a una salida. Además, los bloques se conectan entre sí: la salida de un bloque puede alimentar la entrada de otro. Estos bloques definen las funciones de un sistema.

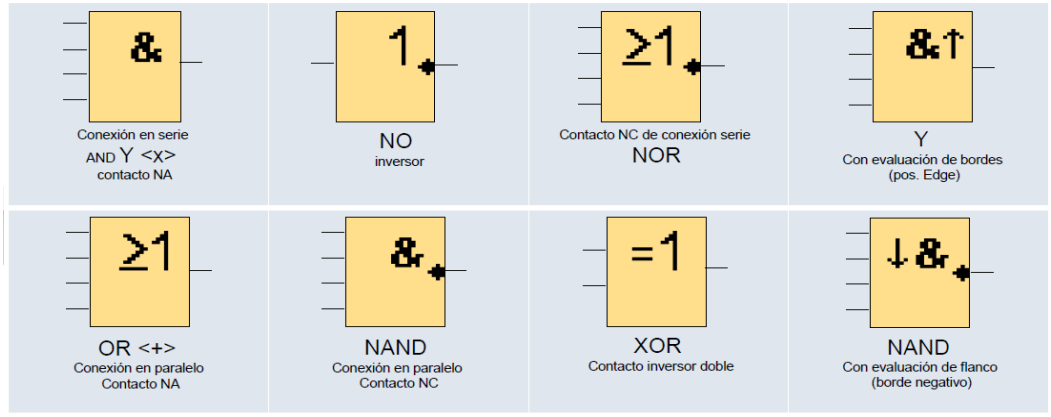


Ilustración 3 Bloques de Función

El lenguaje FBD es relativamente sencillo, aunque requiere cierta formación para su uso. Es una excelente opción para PLC de seguridad, bucles PID y cuando se necesita encapsular, reutilizar código con frecuencia, ocultar o conservar datos o filtrar entradas analógicas.

- **Diagramas de Funciones Secuenciales (SFC)**

Los Diagramas de Funciones Secuenciales (SFC) son un lenguaje gráfico de programación de PLC basado en GRAFCET y se asemejan a los diagramas de flujo de algoritmos informáticos. SFC consta de pasos y transiciones. Los pasos son las acciones para realizar y las transiciones son las condiciones lógicas que deben cumplirse antes de pasar al siguiente paso. Debido a la naturaleza de esta arquitectura, SFC controla el flujo operativo de un programa.

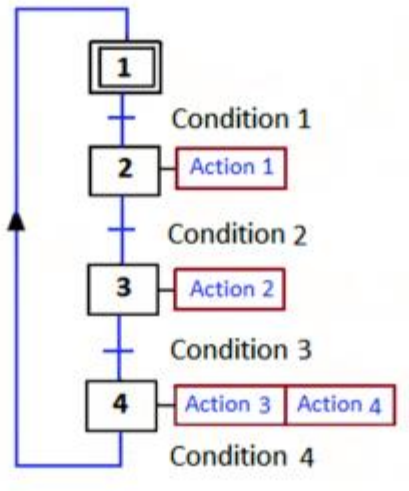


Ilustración 4 Diagramas de Funciones Secuenciales

Una de las principales ventajas de usar SFC es que simplifica un proceso complejo al dividirlo en partes más manejables. Además, facilita las pruebas y la resolución de problemas en comparación con otros lenguajes de programación. SFC es ideal para procesos complejos de múltiples estados, procesos enlazados, cuando se ejecutan múltiples procesos en paralelo o secuencialmente, y para la producción por lotes.

- **Texto Estructurado (ST)**

El texto estructurado es un lenguaje de programación PLC de alto nivel. Es un lenguaje textual, con una sintaxis comparable a la de C o C++, donde las sentencias (como IF, por ejemplo) se utilizan para realizar funciones.

ST es un lenguaje conciso que se ejecuta rápidamente y se puede leer sin mayor dificultad. Por otro lado, la resolución de problemas puede ser un proceso más complejo, ya que los estados de las variables no son fácilmente discernibles. Este lenguaje es ideal para tareas como el análisis de códigos de barras, la creación de bucles, la manipulación de datos, la conexión con código máquina, las operaciones matemáticas complejas o la búsqueda de datos.

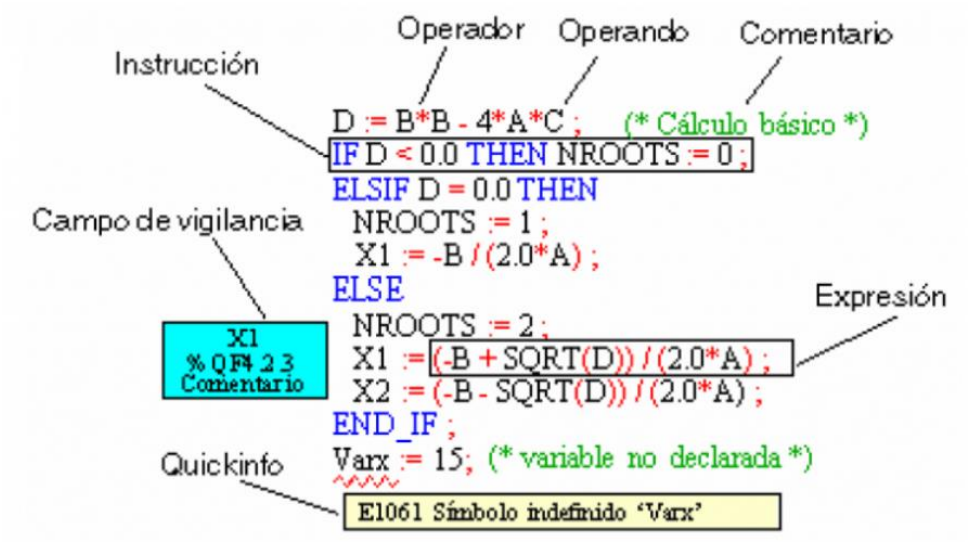


Ilustración 5 Programación de Texto Estructurado

- **Lista de Instrucciones (IL)**

La Lista de Instrucciones es un lenguaje de programación textual de bajo nivel para PLC. La Lista de Instrucciones quedó obsoleta en el estándar IEC, sin embargo, algunos PLC actuales aún utilizan este lenguaje.

Consiste en una serie simple de instrucciones y es similar al lenguaje ensamblador. "Saltar" o "almacenar" son ejemplos de algunos de los comandos comunes que se usarían en la Lista de Instrucciones.

4.2.4 Elementos de accionamiento

Los actuadores son los dispositivos finales que convierten la señal de salida eléctrica del PLC en una acción física para controlar un proceso. En el contexto de la automatización agrícola y los sistemas de riego, los principales elementos de accionamiento son:

- Válvulas/Electroválvulas Solenoide: Utilizadas para regular o cortar el flujo de agua en las tuberías. El PLC las activa o desactiva para dirigir el agua a zonas específicas de riego.



Ilustración 6 Electroválvula Solenoide

- Bombas y Motores: Se emplean para transportar el agua desde la fuente. El PLC controla su encendido y apagado, a menudo a través de relés o contactores para manejar las cargas de potencia del motor.



Ilustración 7 Bomba de Agua

- Aspersores o goteros: Aunque son elementos finales del sistema, el PLC controla indirectamente su activación a través de las electroválvulas que regulan el suministro de agua a sus líneas.



Ilustración 8 Aspersores Agrícolas

4.3 Aplicación en Sistemas de Riego

La aplicación de PLC en sistemas de riego permite la automatización de procesos al combinar la tecnología de control con la agronomía, lo que resulta en un uso más responsable y eficiente del agua (Grillo, 2013).

El PLC puede gestionar con precisión los ciclos de riego por cada zona. Los operadores pueden planear, supervisar y personalizar estos ciclos a través de una interfaz de usuario (Human-Machine Interface o HMI), adaptándolos a las exigencias específicas del cultivo y las condiciones ambientales (Atlantic Group, 2024).

Podríamos enumerar algunas ventajas:

- Riego bajo demanda: El sistema realiza el riego solo cuando las variables (como la humedad del suelo) caen por debajo de los valores establecidos, evitando el desperdicio de agua y el riego excesivo (Universidad Politécnica Salesiana, 2022).
- Sostenibilidad y Eficiencia: La gestión automatizada minimiza el desperdicio, optimiza el consumo de agua y energía, y mejora la continuidad operacional del sistema (Atlantic Group, s.f.; Universidad Ricardo Palma, 2012).

4.4 Teoría de Control Aplicada al Riego

La caña de azúcar requiere un consumo extenso de agua, por lo que mantener la humedad durante todo el ciclo maximiza el rendimiento y la calidad. Un riego controlado permite lograr el equilibrio ideal entre crecimiento y contenido de azúcar; el exceso de agua puede reducir la calidad y el rendimiento.

4.4.1 Sistemas de Control

Para maximizar el rendimiento de la caña de azúcar y promover la producción sostenible, se considera la mejora del control de: monitoreo de humedad, programación de riego, mantenimiento de las líneas de riego; todo esto, en combinación con la aplicación de sistemas automatizados, permite el monitoreo constante no solo de la cantidad de agua que se usa en el campo, sino también conservar mejor el recurso hídrico.

Los sistemas automatizados utilizan equipos como sensores y actuadores para garantizar el rendimiento óptimo del uso del recurso.

4.4.2 Lazo Abierto

Un sistema en lazo abierto es aquel donde la salida no es retroalimentada en la entrada del proceso, por lo tanto, no es comparada con la señal de referencia (Anexo 6).

Son más simples en diseño y funcionamiento, ya que no requieren componentes a dicionales para medir la salida; por lo general, son menos costosos de implementar debido a la baja complejidad. Son adecuados cuando la variable de salida es

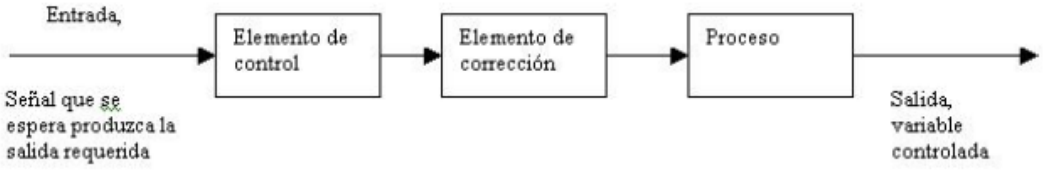


Ilustración 9 Sistema de Lazo abierto

totalmente predecible, con un alto margen de error. En sistemas de riego,

un sistema de lazo abierto (open-loop) es aquel que ejecuta riegos programados según tiempo o volumen, sin utilizar datos de retroalimentación como la humedad del suelo o lluvia.

4.4.3 Lazo Cerrado

Los sistemas de control de lazo cerrado son ampliamente utilizados en una variedad de industrias para regular y controlar procesos automatizados.

Un sistema de control de lazo cerrado, también conocido como sistema de control de realimentación, utiliza una señal de retroalimentación para comparar el resultado deseado con el resultado actual y ajustar el proceso en consecuencia.

Esto permite una mayor precisión y estabilidad en comparación con los sistemas de control de lazo abierto.

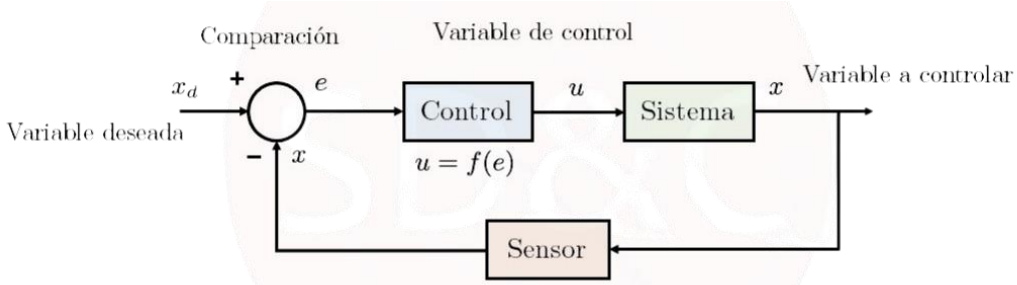


Ilustración 10 Sistema de Lazo Cerrado

Elementos del sistema	
SetPoint	Es el valor deseado o consigna que se quiere alcanzar.
Controlador	Compara la salida real con la referencia y genera una señal de control para reducir el error.
Actuador	Ejecuta la acción de control determinada por el controlador.
Proceso	Es el sistema físico o proceso que se desea controlar.
Sensor	Mide la salida del proceso y la convierte en una señal que pueda ser interpretada por el sistema de control.
Elemento Retroalimentación	Es el camino por donde la señal medida regresa al controlador para ser comparada con la consigna.

Comparador	Calcula la diferencia entre la señal de referencia y la señal de salida real.

Para un sistema de riego, la aplicación de sistemas de lazo cerrado debe incorporar sensores (humedad, lluvia, flujo, nivel, presión, etc.) para ajustar el riego automáticamente, mejorando eficiencia y precisión.

4.4.4 Control Secuencial

Un sistema de control secuencial es un tipo de sistema que utiliza señales lógicas para controlar procesos en un orden específico. Estos sistemas operan con entradas y salidas, donde los valores de las salidas dependen no solo de las entradas actuales, sino también de los estados anteriores.

Los sistemas secuenciales más simples son los biestables, que almacenan información en binario y permiten mantener estados establecidos incluso después de que la señal de entrada desaparezca.

Existen dos tipos principales de circuitos secuenciales: síncronos, donde las transiciones ocurren en momentos específicos de un reloj, y asíncronos, donde las transiciones pueden ocurrir en cualquier momento dependiendo de las entradas.

Estos sistemas son ampliamente utilizados en la automatización industrial para controlar y procesar información sobre condiciones del proceso.

4.4.5 Tipos de sistemas de control

EL PID es un tipo de control de lazo cerrado que corrige el error entre un valor deseado (Referencia o SetPoint) y el valor de la variable de proceso (Valor medido). Para esto existen 3 formas:

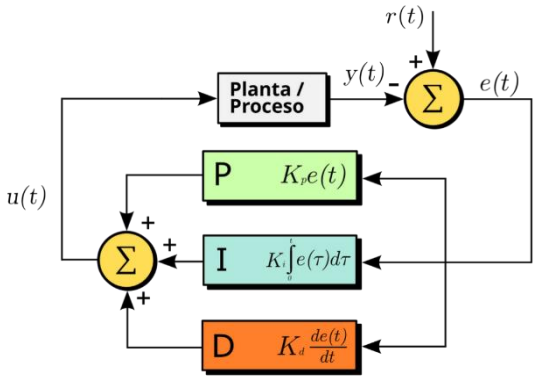


Ilustración 11 Diagrama PID

- P: Proporcional.
- PI: Proporcional Integral.
- PID: Proporcional Integral Derivativo.

4.4.6 Tipos de sintonización

4.1.5.2 Método de Ziegler-Nichols en lazo cerrado

Es un método empírico para sintonizar un controlador PID sin necesidad de conocer el modelo del sistema. Requiere aumentar progresivamente Kp hasta que el sistema entre en oscilación sostenida.

4.1.5.3 Método de Cohen-Coon

Es un método de sintonización PID basado en la respuesta al escalón de un sistema. Está diseñado para sistemas con retardo (tiempo muerto). Para implementarlo, se aplica un escalón al sistema y se registra la respuesta temporal, y posteriormente se ajusta la curva a un modelo de primer orden con retardo.

4.1.5.4 Sintonización por Software

Muchos controladores lógicos programables tienen funciones de auto-tune integradas. Estas hacen automáticamente:

- Ensayos tipo escalón.
- Estimación de parámetros como ganancia, retardo, tiempo muerto.
- Cálculo automático de Kp, Ti, y Td.

Marcas como Siemens, Allen-Bradley, Omron, Honeywell tienen estas funciones.

V. Metodología del Proyecto

5.1. Enfoque de investigación

La presente investigación se desarrolla bajo un enfoque cuantitativo de carácter técnico-descriptivo.

5.2. Diseño de Proyecto

El diseño de la presente investigación de tipo:

- Documental: Se fundamenta en la revisión y análisis de estándares, hojas de datos de fabricantes y estudios previos sobre riego de caña de azúcar.
- Descriptivo: Identificar las variables y componentes necesarios para un sistema de riego automatizado, caracterizando su funcionamiento y relación lógica.
- Propositivo: Esta investigación no lleva a una construcción física final, sino que es un esquema técnico detallado que sirve como base para futuras implementaciones.

Las fases utilizadas serán las siguientes:

- Análisis del Problema y Levantamiento de Requerimientos.
- Diseño del Sistema de Control Automatizado.
- Programación y desarrollo de la lógica de control.
- Integración, pruebas en campo y validación.
- Documentación Final y Presentación de Resultados.

5.3. Técnicas y métodos

Para el cumplimiento de los objetivos investigativos se aplican las siguientes técnicas:

- **Análisis de Requerimientos:** Evaluación técnica de las necesidades hídricas de la caña de azúcar y las condiciones operativas de las estaciones de bombeo en la zona occidental del país.

- **Modelado de Arquitectura de Control:** Técnica de diseño de sistemas para definir la jerarquía entre sensores, controladores y actuadores a través de diagramas de bloques funcionales.
- **Desarrollo de Lógica Algorítmica:** Elaboración de la secuencia de operación, permitiendo estructurar el comportamiento teórico del sistema ante diversas variables.
- **Simulación Teórica:** Validación de la lógica de programación mediante herramientas de software especializadas para verificar la viabilidad de las rutinas de seguridad y gestión de alarmas antes de su documentación final.

5.4. Materiales y recursos

- Recursos de Información
- Recursos de Diseño (Software).
- Hardware Referencial

5.5. Procedimientos

5.5.1. Fase 1: Análisis del Problema y Levantamiento de Requerimientos

Esta fase se centra en comprender la forma operativa, los desafíos actuales en la gestión del riego de caña de azúcar en la zona occidental de Nicaragua. Se realiza una revisión a fondo de investigaciones previas, estándares técnicos y literatura sobre sistemas de riego, automatización agrícola y control con automatización, relés lógicos programables y sistemas de automatización de código abierto, y se complementa con levantamiento de información en campo o entrevistas técnicas con personal operativo.

Se analizan variables como disponibilidad del recurso hídrico, condiciones de operación de bombas, canales abiertos, cuencas hidrográficas, pozos, eficiencia y uniformidad del riego, nivel de automatización y requerimientos de seguridad operacional.

Producto de la fase se obtiene un preliminar de:

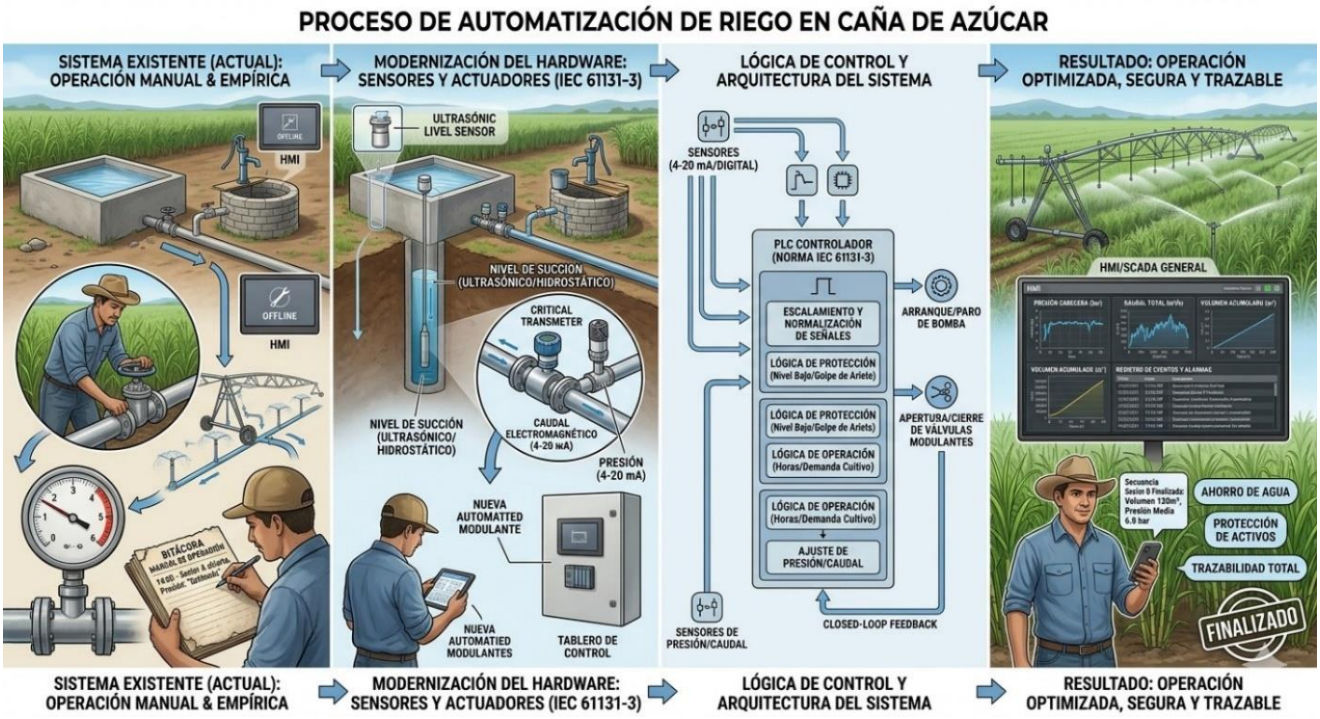
a) Sensores (nivel, flujo, presión y humedad del suelo) a utilizar en dependencia de la forma de extracción y riego en los cultivos de caña. (Anexo 5,6,7)
b) Actuadores Neumáticos (Válvulas de on/off y control electrónico de posición de válvula).
c) Tipo de controlador a utilizar en dependencia del grado de complejidad del sistema.
d) Elementos de control de mando para el gabinete armado a pie de máquina, para garantizar la protección del sistema de automatización. (anexo 8)

5.5.2 Fase 2: Diseño del Sistema de Control Automatizado

5.5.2.1 Diseño de arquitectura del sistema

Se elabora el diagrama de bloques (sensores–PLC–actuadores–HMI) para definir los tipos de señales que se pueden utilizar en dependencia de los tipos de sensores y actuadores que se puedan utilizar según la aplicación (digitales, analógicas, discretas).

Una vez seleccionados los tipos de sensores y tecnología de control, se seleccionan los módulos de E/S para así lograr dimensionar con precisión los tipos de protección tanto para la parte más sensible de control como para las señales provenientes de la instrumentación.



5.5.2.2 Selección de hardware

La selección del PLC (compacto o modular) debe considerar la cantidad de E/S, expansión, compatibilidad con señales analógicas 4–20 mA o señales digitales (binarias, de pulso o frecuencia) para los distintos E/S que vienen de los instrumentos.

Esta selección se debe considerar con estándares de robustez bajo la normativa IP/NEMA para los gabinetes de control que estarán expuestos a la intemperie bajo condiciones extremas.

La selección del hardware va de la mano con la disponibilidad de repuestos en el mercado de todas las partes del sistema y un software que preste las herramientas

de ingeniería necesarias para la escalabilidad del programa, garantizando una comprensión adecuada según la norma IEC.

Los sensores, transmisores y actuadores se eligen en dependencia del rango de medición según la aplicación, de la precisión que disponga la empresa o el organismo de auditoría para el recurso hídrico en Nicaragua (ANA) (linealidad, histéresis, materiales y compatibilidad eléctrica).

Marca	Modelo	Función Principal	Costo Mercado Nicaragua
SIEMENS	SIMATIC S7	Auto Tuning	$ 350
Rockwell	Compact Logix	Auto Tuning	$ 580
Schneider	M221	Sin Auto Tuning	$ 265

La familia SIMATIC S7, es un controlador diseñado de forma compacta para automatización industrial. Ideal para aplicaciones de tamaño medio y ofrece integración con otros ecosistemas por su estandarización de comunicación mediante TIA PORTAL.

5.5.2.3 Diseño del flujo lógico de control

Se elaboran diagramas según la norma IEC 61131-3 (LD, FBD o SFC) que representen secuencias de riego, lógicas de arranque y paro, consignas de seguridad (bajo nivel, sobrepresión) y control basado en umbrales de humedad/caudal, nivel y presión en la línea. (Anexo 9)

5.5.2.4 Diseño de protecciones y fallos

Se definen rutinas de seguridad, paro de emergencia, manejo de alarmas, enclavamientos, y condiciones críticas que requieren detención controlada.

El estudio de esta fase tendrá como resultado el diseño del diagrama eléctrico y de control, del diagrama de bloques del sistema.

5.5.3 Fase 3: Programación y Desarrollo de la Lógica de Control

5.5.3.1 Programación de módulos funcionales

Para el tratamiento de señales se realiza el escalado y la normalización de señales analógicas (4–20 mA) y la lectura de las señales digitales.

Con la lectura de las señales se valida el estado de los elementos de accionamiento de válvulas, la secuencia de arranque y paro de motores para el manejo del tiempo según las condiciones de la parte sensorial.

La implementación de un sistema de control PID, ya sea de lazo cerrado o abierto, permite tener un mejor control y autonomía del sistema partiendo de las señales de presión, nivel y caudal, si aplica.

5.5.3.2 Control secuencial

Mediante la utilización de SFC/LD se programan las etapas del ciclo: preparación, operación, supervisión y cierre, garantizando que cada transición dependa de condiciones seguras y verificables.

5.5.3.3 Gestión de alarmas y fallos

En la fase de gestión se pueden trabajar alarmas y fallos del sistema:

a) Caída de presión.
b) Sobrecarga de bomba.
c) Fallo de sensor.

Se implementa un registro de eventos y bitácora para trazabilidad y mantenimiento.

5.5.3.4 Pruebas de simulación

Se ejecutan simulaciones con escenarios normales y de falla para depurar la lógica antes de las pruebas en campo.

Esta fase nos permite revisar la viabilidad del sistema bajo los parámetros establecidos según el estudio del área de trabajo en conjunto con los componentes

del sistema a utilizar. Proporcionando información para la mejora del sistema antes de la implementación.

5.5.4 Fase 4: Integración, Pruebas en Campo y Validación

5.5.4.1 Pruebas unitarias

En las pruebas unitarias se verifica de manera individual el comportamiento de los sensores, la respuesta en tiempo de las electroválvulas, relés, bombas, según la información proveniente de los sensores que es procesada por los módulos de E/S del controlador a utilizar.

5.5.4.2 Pruebas de integración

Las pruebas de integración se realizan en la ejecución del sistema completo bajo condiciones reales con observación del comportamiento dinámico, midiendo la robustez ante perturbaciones del sistema tales como caída de presión, variación de demanda, bajo o alto nivel, humedad de los suelos.

5.5.4.3 Ajuste de parámetros

Las pruebas de integración nos permiten realizar ajustes de parámetros y calibración de sensores, ajuste de setpoints para la coordinación de los controladores (ganancias PID) y verificación de estabilidad.

5.5.4.4 Validación final

Todos estos parámetros verificados en las pruebas nos dan la idea clara de la uniformidad que se puede lograr con un sistema de riego y medición tanto de la eficiencia energética como del recurso hídrico que se está utilizando.

5.5.5 Fase 5: Documentación Final y Presentación de Resultados

Cumplidas las fases anteriores, se tendrá la documentación técnica del esquema de control, diagramas, listas de E/S, tecnología de sensores y controladores que se pueden utilizar en un sistema de riego en plantaciones de caña de azúcar.

VI. Desarrollo del Proyecto

6.1. Descripción de la operación de riego

El sistema de riego en plantaciones de caña de azúcar de la zona occidental opera típicamente con extracción desde pozos, reservorios o cuencas hidrográficas que ingresan a las plantaciones. El método de extracción es típicamente por impulsión con bomba centrífuga y distribución mediante tuberías principales que alimentan ramales/aspersores o un pivote central, según el lote.

La operación actual se ejecuta en ventanas horarias planificadas por disponibilidad del recurso hídrico y demanda de cultivo, con maniobras manuales de arranque/paro de la bomba y apertura/cierre de válvulas.

6.2. Dinámica operativa

La situación básica de riego se divide por etapas:

Inicio de riego: El operador verifica disponibilidad de agua, energiza el tablero y abre válvulas.

Punto de control hidráulico: La presión se usa como referencia empírica para “estimar” el caudal hacia el bloque de riego; no suele existir control automático que compense variaciones de demanda (cambios de sector, viento, uso simultáneo en otros lotes).

Criterio de término de secuencia: El paro se define por tiempo o volumen estimado; rara vez se usa retroalimentación de humedad del suelo o precipitación efectiva.

Registro: Se llevan bitácoras manuales de horas de operación y cambios de sector, sin integración con variables de proceso (presión, caudal, eventos).

6.2.1. Descripción Sistema de riego existente

Los sistemas de riego hidráulico-mecánico por lo general se componen de:

Fuente: pozo profundo o reservorio; línea de succión con válvula de pie y colador.

Impulsión: (potencia y curva según diseño), válvula antirretorno y válvula de distribución.

Red de distribución: Su división parte de la tubería principal y de las secundarias, donde se dirigen con otras derivaciones hacia los aspersores/ramales, pivote central o lineal.

Válvulas: los sistemas on/off manuales son colocados en sectores donde no se dispone, en general, de sistemas de válvulas modulantes, cuya función principal es la regulación del flujo que entra a la tubería según la demanda.

Tablero de control

Los elementos de accionamiento son colocados en gabinetes que cumplan con normativa (NEMA / IEC) para el uso en exteriores.

Gabinete: un gabinete de control dispone de un interruptor principal, protección térmica/magnética para motor, contactor y relé de sobrecarga.

Instrumentación analógica: Los manómetros analógicos locales son instrumentos que funcionan con medición en el punto; también, en muchos casos, sin transmisores de presión/caudal/niveles conectados al controlador.

Operación: Se realizan por maniobras locales; muchas veces dependen de horas establecidas para visualizar las operaciones en curso. Este modo no dispone de recursos digitales de visualización como HMI con consigna ni registro de alarmas; sin integración a sistemas de visualización más robustos.

6.2.2. Identificación de variables críticas

Variables de proceso (hidráulicas)

Presión (bar): variable de control primaria para mantener uniformidad de aspersión; define el desempeño de los emisores y del pivote.

Rango preliminar: 0–10 bar (ajustar al diseño del sistema).

Exactitud requerida: ≤ ±1 % FS.

Frecuencia de muestreo: ≥ 1 Hz (control continuo).

Caudal total (m³/h): indicador de demanda de flujo; permite totalizar el volumen aplicado por lote.

Rango preliminar: según bomba (p. ej., 0–400 m³/h).

Exactitud: ≤ ±0,5–1 % de lectura (electromagnético).

Muestreo: ≥ 1 Hz; **pulso** o **4–20 mA**.

Nivel de succión (m): protección de **bomba en seco**; habilitación de arranque y control de reposo.

Tecnología: ultrasónica o hidrostática 4–20 mA.

Alarma: nivel bajo → bloqueo de arranque/paro inmediato.

Variables agro–ambientales

Humedad del suelo (% VWC o kPa): criterio de inicio/fin de riego por demanda.

Precipitación/viento/temperatura: correcciones a la lámina efectiva y programación.

Variables eléctricas/activos

Tensión/corriente/potencia (kW/kWh): rendimiento energético de la estación de bombeo.

Estado del motor/VFD: fallas, temperaturas, eventos.

Estados y eventos

Estado de válvulas (abierta/cerrada), bomba (ON/OFF), modos (Man/Auto/Mantto), alarmas (bajo nivel, sobrepresión, falla de sensor, sobrecarga).

Criterios iniciales de desempeño

Uniformidad de aplicación (CU) conforme a diseño; banda de ±5–10 % en presión de cabecera durante la operación.

Seguridad: sin arranques con nivel bajo; secuencia de paro que elimine el golpe de ariete.

Trazabilidad: registro de volumen aplicado, eventos y alarmas con sello de tiempo.

6.2.3. Selección de instrumentación

6.2.3.1. Especificación técnica de sensores de medición

Presión (4–20 mA, 0–10 bar o según diseño): cuerpo en acero inoxidable, IP67/68, salida de 2 hilos, exactitud ≤ ±1 % FS; puerto 1/2" NPT o G1/4".

Caudal (electromagnético) DN acorde a la línea, revestimiento resistente a agua cruda, salida 4–20 mA + pulsos y/o comunicación; exactitud ≤ ±0,5–1 %.

Sensor de nivel ultrasónico (reservorios abiertos) con compensación de temperatura y zona muerta configurada.

Sensor de nivel hidrostático (pozos) con capilar/venteo, salida 4–20 mA, cable sumergible.

Humedad del suelo (opcional): capacitivo/FDR con salida 4–20 mA o Modbus, estandarizado por profundidad de instalación.

6.3. Diseño y arquitectura y lógica del sistema

6.3.1. Arquitectura general del sistema

La arquitectura del sistema garantiza una operación fiable, segura y trazable para el riego, ya que integra los sensores tanto para la gestión del agua proveniente de las fuentes hídricas como para la supervisión de las líneas de bombeo. Los sensores de nivel, presión y flujo actúan directamente con las aperturas y cierre de las válvulas. Es por eso por lo que el escalamiento y la normalización de señales sensoriales según la norma IEC 61131-3 se deben realizar de forma correcta para obtener como resultado una señal limpia en la que se puedan tomar acciones.

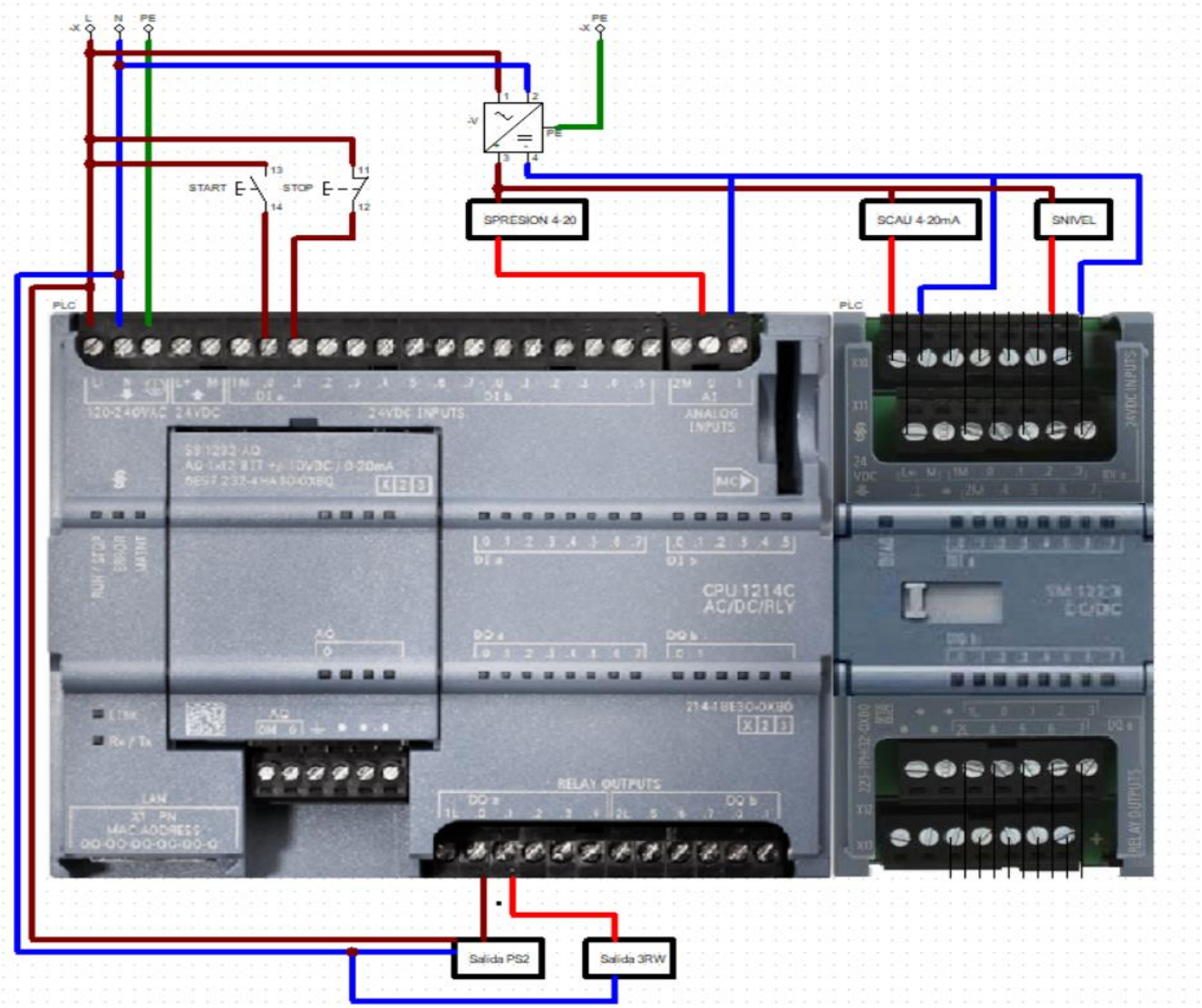


Ilustración 12 Arquitectura del Sistema

6.3.2. Selección técnica del hardware

Las entradas y salidas analógicas se comportan como valores crudos y se convierten en valores digitales fáciles de leer para la operación.

Durante la selección del hardware se debe comprobar que los equipos tengan la capacidad de poder tratar señales analógicas de 0-20 mA o 0-10 V en dependencia del tipo de sensor a utilizar.

Los bloques funciones del sistema de dividen:

a. Capa de campo: La lectura de transmisores, sensores y actuadores.
b. Capa de control: Lectura de E/S para la ejecución de secuencias y gestión de alarmas.
c. Capa de supervisión: visualización de señales digitales previamente tratadas, consignas, estados y bitácoras de eventos y alarmas.
d. Comunicación: La selección de protocolos de comunicación industrial más comunes, Profinet, Profibus, EtherNet/IP, HART, etc.
e. Acondicionamiento y energía: los gabinetes de control deben cumplir con grados de protección según la norma implementada por cada industria; esta puede ser IEC o Nema.

6.3.3. Sensores y actuadores

Los sensores de campo son la supervisión de la operación, por lo tanto, deben cumplir con grados de protección para exterior y uso rudo bajo condiciones no favorables.

Bajo el criterio general, los sensores recomendados para la operación de riesgos son:

a. Presión: los rangos acordes a operaciones hidráulicas rondan entre 0-10 bar con señales analógicas 4-20 mA para un mejor escalamiento de señal. Ofreciendo menos caída de tensión por la distancia entre el sensor y los equipos de control.

Sensor de presión Autonics Serie TPS20



Ilustración 13 Sensor de presión Autonics Serie TPS20

Característica	Detalle Técnico
Tipo de Medición	Presión relativa (Gauge)
Elemento Sensor	Piezoresistivo de estado sólido (Diafragma de acero inoxidable)
Rango de Presión	Desde 0-0.35 kgf/cm² hasta 0-350 kgf/cm² (según modelo)
Precisión (Exactitud)	± 0.3 % F.S. (Full Scale)
Señal de Salida	CC 4-20 mA (Tipo 2 hilos)
Alimentación	15-35 VCC
Materiales en contacto	Acero Inoxidable 316
Temperatura de Trabajo	Ambiente: -10 a 70°C
Grado de Protección	IP67 (Estándar IEC)

b. Caudal: los caudales pueden ser supervisados de forma análoga con equipos de contacto o de forma digital con implementación de sensores de flujo electromagnético con variables internas para el censado de volúmenes, caudal, registro de eventos, alarmas, etc.

Sensor de Caudal Badger Meter M-Series M2000



Ilustración 14 Sensor de Caudal Badger Meter M-Series M2000

Característica	Detalle Técnico
Tipo de Medición	Electromagnético (Sin partes móviles)
Precisión del Sistema	± 0.25 % de la lectura
Rango de Diámetros	DN 6 a DN 1200 (1/4" a 48")
Repetibilidad	± 0.1%
Conductividad Mínima	> 5 µS/cm
Salidas Estándar	1 analógica (4-20 mA), 2 de Pulso/Frecuencia, 2 de Estado/Alarma
Protocolos de Comunicación	Modbus RTU (Estándar), HART, Profibus DP, EtherNet/IP
Pantalla	LCD de 4 líneas retroiluminada
Grado de Protección	IP67 (NEMA 4X) estándar
Alimentación	85-265 V CA o 10-36 V CC
Registro de Datos	Almacenamiento interno para registro de eventos y errores

c. Nivel: la medición de nivel se realiza en los pozos, embalse o cuencas hidrográficas, donde también nos permite registrar los niveles históricos del agua en temporadas de alta y baja demanda. Las señales de los sensores de nivel típicamente están en rangos de 0-12 m para las tecnologías ultrasónicas y de radar, pero para la medición de pozo se utiliza un sistema de presión hidrostática, que, haciendo uso del principio de presión, utiliza la columna de agua por metro cuadrado para calcular el nivel. Los rangos de medición de los hidrostáticos rondan entre 0-400 mmH2O.

Sensor de Nivel Ultrasónico Siemens SITRANS LU240



Ilustración 15 Sensor de Nivel Ultrasónico Siemens SITRANS LU240

Característica	Detalle Técnico
Tecnología	Ultrasónica (Sin contacto)
Rango de Medición	Versiones de **3 m, 6 m y 12 m**
Precisión	± 6 mm o 0.15% del rango
Salida de Señal	4-20 mA con **HART 7**
Ángulo de Haz	**10°**
Material del Sensor	ETFE o PVDF (Alta resistencia química)
Grado de Protección	**IP68 / NEMA 6** (Soporta inmersión accidental)
Configuración	Pantalla local con 4 botones o vía Bluetooth/HART
Temperatura de Proceso	-40 °C a 85 °C

Sensor de Nivel Hidrostático Siemens SITRANS LH100



Ilustración 16 Sensor de Nivel Hidrostático Siemens SITRANS LH100

Característica	Detalle Técnico
Tecnología	Hidrostática
Principio de Medida	Presión de columna de agua
Rangos de Medida	De **0-3 mH2O** hasta **0-20 mH2O**
Precisión	± 0.3% del valor final de escala
Señal de Salida	4-20 mA (Tecnología de 2 hilos)
Material de Carcasa	Acero inoxidable 316L (1.4404)
Diámetro	**23.4 mm** (Muy delgado, cabe en tubos de 1 pulgada)
Grado de Protección	**IP68** (Diseñado para inmersión permanente)
Temperatura	-10 °C a 80 °C

d. Sensor de humedad: Los sensores de humedad utilizan tecnología capacitiva/frecuencia. Generan un campo magnético que interactúa con el agua puesta en la tierra. Esto fácilmente se puede incorporar a la lógica de "inicio/parada por demanda".

6.4. Desarrollo de la lógica de control

6.4.1. Tratamiento de señales

6.4.1.1. Escalado de señales analógicas

El escalado de señales analógicas es un proceso fundamental en la automatización y control de sistemas. Se utiliza para convertir valores analógicos, como voltajes o corrientes, en valores digitales que pueden ser procesados por un PLC.

Para escalar una señal se estudia la longitud de la señal que se va a escalar (Anexo 9). Por ejemplo, para un valor analógico de medida 2-6 bar que genera una señal de corriente entre 4-20 mA, donde:

Valor de entrada mínima= 4mA

Valor de entrada Máxima= 20mA

Salida Real Mínimo= 0 bar (VALUE)

Salida Real Máximo= 6 bar (VALUE)

$$\frac{Valor\ Real\ VALUE\ -\ Minimo\ de\ escala}{Maximo\ de\ escala\ -\ Minimo\ de\ escala} = \frac{Valor\ Real\ VALUE\ -\ Valor\ 4mA}{Valor\ \ 20mA\ -\ Valor\ \ 4\ mA}$$

Los controladores (dependiendo de la marca) utilizan valores enteros dentro de un rango para realizar la lectura y asociar el valor real al valor digital. Para el caso de las tarjetas de comunicación 0-20 mA el valor asociado es 0-27648. También existen las tarjetas de comunicación analógicas de 4-20 mA con el valor asociado 5530-27648. Los sensores con escala fuera de estos rangos se consideran defectuosos.

En el escalado en TIA PORTAL la señal analógica se realiza la conversión a valores del rango del sensor haciendo uso del bloque de función SCALE_X con los siguientes parámetros.

	Descripción	Valor
EN	Entrada habilitada	1
Value	Nombre de dirección	%MD0
Min / Max	Valor de escala	0-250
Out	Nombre de dirección	%MD4

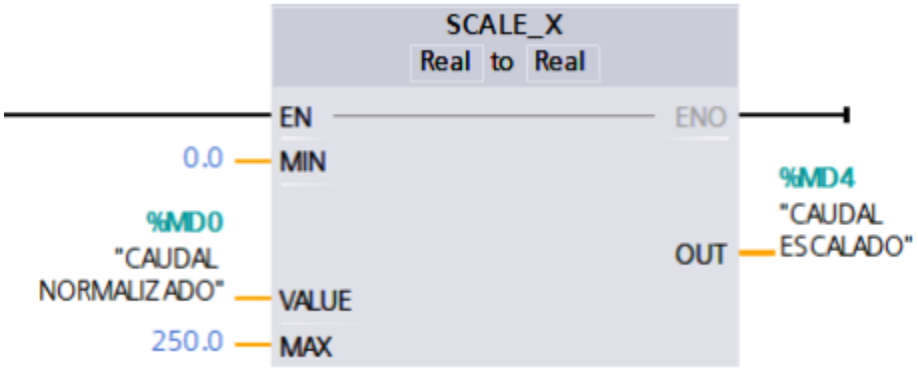


Ilustración 17 Bloque de Escalado de Señal Analógica

6.4.1.2. Normalizado de señales analógicas

La normalización de una señal analógica es un proceso esencial en la automatización industrial y en la gestión de datos de sensores. Este proceso implica

convertir los valores analógicos, que pueden variar dentro de un rango determinado, en valores numéricos que sean útiles para el procesamiento y control.

Estos valores digitalizados pueden ser procesados más fácilmente desde el programador cuando están normalizados/escalados. Normalizar (escala) significa convertir el valor entero (de la entrada analógica 'PIW') en un número real, que se refiere al voltaje en la entrada o salida analógica. Por ejemplo, medir un voltaje de 0-10 V debe corresponder al número real de 0,0 a 10,0.

Para realizar en programación en TIA PORTAL se hará uso del bloque NORM_X el cual contará con los siguientes parámetros.

	Valor Min	Valor Max	Tipo de variable
Señal sensor	4mA	20mA	
Lectura PLC	0	27648	
Variable			%IW100; IA

EN: Entrada habilitada.

VALUE: Nombre de la dirección.

Min / Max: valor mínimo y máximo.

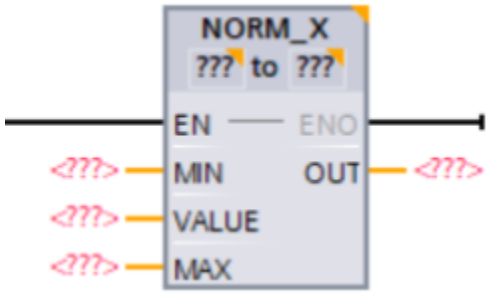
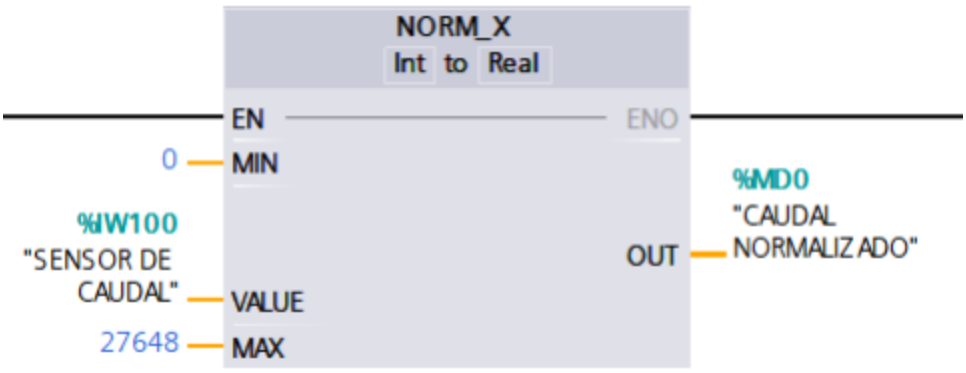


Ilustración 18 Bloque de Normalización



6.4.1.3. Programación

6.4.1.3.1. Segmento 1 ciclo de arranque

Se habilitan las salidas y entradas digitales y analógicas, describiendo un sistema de arranque y paro manual y vía red.

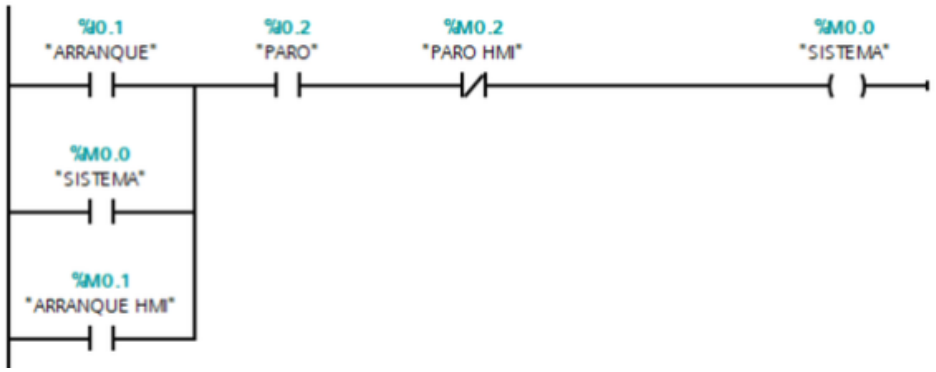


Ilustración 19 Programación Primer Segmento

6.4.1.3.2. Segmento 2 Tratamiento de señal

Para la asignación de valores a la salida analógica del sistema de control, se hará uso de los bloques NORM_X y SCALE_X para que estos después de tratar puedan enviar la señal de acción de control definida por el bloque PID_Compact a la salida analógica del PLC.

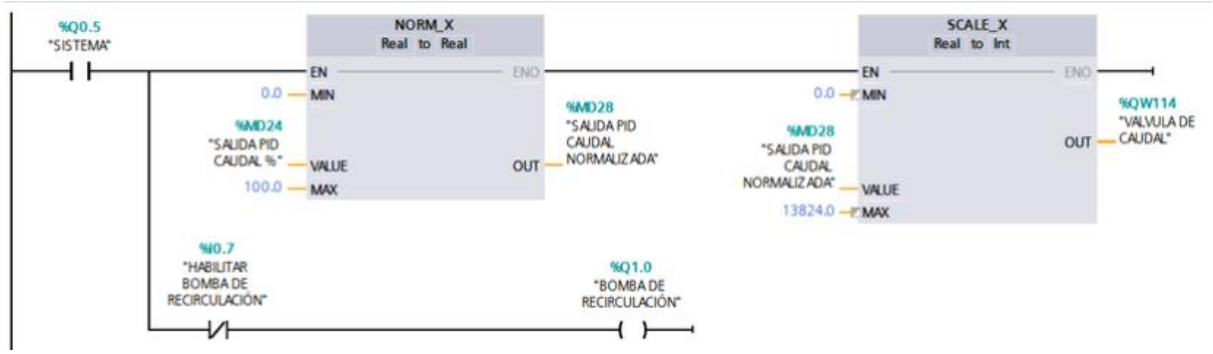


Ilustración 20 Conexión de bloque Normalizado a Escalado

Se coloco 1 contacto normalmente abierto en serie al normalizado y escalado de la salida analógica ya que el sistema debe estar activo para realizar la sintonización.

6.4.1.3.3. Segmento 3 direccionamiento

La asignación de direccionamiento a las variables de acuerdo con el entorno de programación, modelo de PLC y conexión física.

Variable	Dirección en TIA PORTAL
Arranque	I0.1
Paro	I0.2
Sistema	M0.0
Selector	I0.7
Transmisor	IW100; IW101
Salida analógica	QW114

6.4.1.3.4. Segmento 4 Sintonización

El bloque Pid_compact es un controlador universal diseñado para regular procesos técnicos continuos como temperatura, presión, flujo, nivel etc.

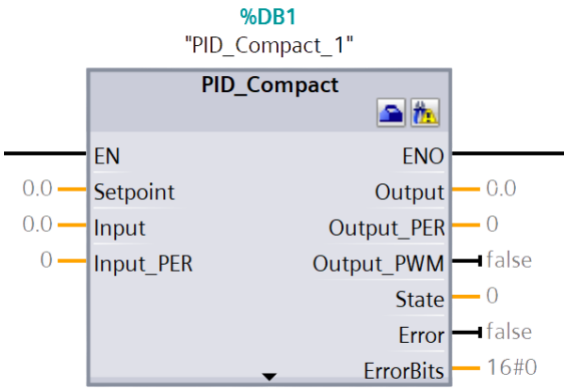


Ilustración 21 Bloque de Sintonización

Parámetros de entrada	
SetPoint	Es el valor deseado o consigna. Es el punto al que se desea llegar
Input	Es el valor actual del proceso en formato REAL (flotante).
Input_Per	El valor analógico sin escalar, directo de la entrada %IW…
OutPut	El valor d control calculado en formato flotante
OutPut_PER	El valor de control en formato Analógico

El bloque PID_Compact funciona dentro un bloque especual llamado Cyclic Interrupt es un tipo especial de bloque de organización en el PLC se configura para que el PLC funciones de forma cíclica en ms (100ms).

FINE TUNING se refiere al proceso de ajustar con precisión los parámetros del controlador PID para mejorar el rendimiento del sistema, como la precisión y la estabilidad, minimizando el error y evitando oscilaciones o sobrepasos excesivos.

Dentro de las configuraciones de estos bloques se configura para que calcule el modelado de la función matemática de forma automática, tomando en cuenta los valores analógicos deseado. El auto tunning arroja como resultado los valores de Kp, Ti, Td.

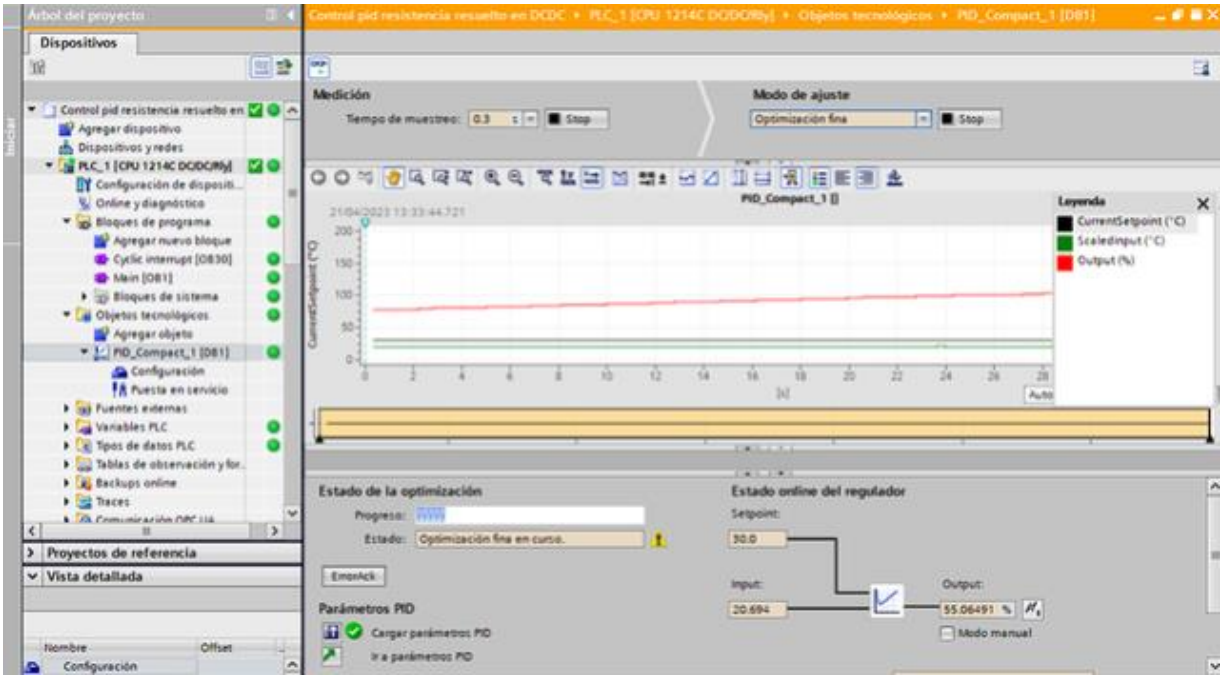


Ilustración 22 Proceso de Auto Tune

6.4.2. Modo de funcionamiento

Para el funcionamiento del sistema se establecen 3 modos: manual, automático y mantenimiento.

Manual: establece el funcionamiento supervisado sobre las variables de flujo, presión y nivel en dependencia de la operación de riego; se abren las válvulas y se arranca el bombeo del flujo.

Automático: establece el accionamiento remoto del sistema, verificando de forma automática los estados de las válvulas, niveles, presiones y flujo entregado al riego.

Mantenimiento: establece un paro seguro de los arranques, paro, bloqueo de válvulas del sistema, esto con el fin de brindar servicio al componente afectado durante la operación.

La secuencia de arranque automático inicia con la verificación de las condiciones, presión, niveles y bloqueos del sistema. Si una de estas etapas está fuera de parámetros, la regla nos dice que no se puede realizar ninguna acción en las salidas del sistema. (Anexo 11) (Control de válvulas, secuencia de arranque/paro de bombas, temporizaciones, estados y modos (Manual/Auto/mantenimiento)).

6.4.3. Secuencia de arranque

6.4.3.1. Control secuencial

El control secuencial permite ordenar el comportamiento del sistema en pasos claramente definidos para garantizar una operación segura y lógica. Se implementa mediante SFC (GRAFCET) o Ladder (LD) (Anexo 12).

6.4.3.2. Gestión de alarmas, eventos y bitácoras

El sistema incorpora un módulo integral de gestión de alarmas cuyo objetivo es preservar la integridad del equipo, garantizar la seguridad operacional y brindar herramientas de mantenimiento preventivo y correctivo.

Bajo nivel

1- Activación de paro de bomba
    a. Evita la cavitación y los daños mecánicos.

Caída de presión en línea

1- Indica fuga, línea obstruida o falla de válvula.
    a. El sistema reduce el caudal o detiene el riego.

Sobrecarga eléctrica de bomba

1- Controlada mediante relé térmico o protección electrónica.
    a. Causa paro de emergencia del motor.

Falla de sensor

1- Señal fuera de rango, desconexión o lectura no válida.
    a. Se registra el evento y se autentica el estado si existen sensores redundantes.

VII. Conclusiones

Se determinó que, para una gestión hídrica eficiente en el cultivo de caña de azúcar, es fundamental el uso de instrumentación con señales estandarizadas, como los transductores de presión y sensores de nivel con salida de 4-20 mA, los cuales permiten una integración precisa con el PLC para mantener la presión constante en los aspersores y proteger los equipos de bombeo contra el funcionamiento en seco.

En cuanto a los actuadores, se identificó que el uso de electroválvulas solenoide y variadores para motores permite un control dinámico del flujo, reduciendo el desperdicio de agua y la fatiga mecánica de la infraestructura hidráulica.

El diseño de la arquitectura de control propuesta centraliza la operación en un PLC (compacto o modular), el cual actúa como núcleo para procesar las señales provenientes de los módulos de entrada (analógicas y digitales) y ejecutar las acciones a través de los módulos de salida hacia los contactores y válvulas.

Se estableció que la interconexión debe seguir normativas de robustez IP/NEMA para garantizar que los componentes electrónicos soporten las condiciones extremas de la zona occidental de Nicaragua, asegurando la continuidad operativa del sistema de riego.

La documentación del esquema de control automatizado demuestra que la integración de tecnologías de automatización industrial y estrategias de control en lazo cerrado es una solución viable y necesaria para optimizar el recurso hídrico en las plantaciones de caña de azúcar en Nicaragua, logrando un equilibrio entre la productividad agrícola y la sostenibilidad ambiental.

VIII. Recomendaciones

Se recomienda proceder con la fase de implementación física del sistema de control documentado, iniciando con una prueba piloto en una sección controlada de la plantación. Esto permitirá validar la respuesta de los algoritmos de control ante las variables reales de campo (presión, humedad y flujo) y realizar los ajustes necesarios en el sintonismo de los lazos de control antes de su despliegue a gran escala.

Para garantizar la rentabilidad de la inversión y la longevidad del sistema, se recomienda que todos los componentes electrónicos y electromecánicos (sensores, PLC, variadores y actuadores) sean de grado industrial. Se debe evitar el uso de componentes de gama educativa o comercial, priorizando equipos que posean certificaciones de resistencia a vibraciones, altas temperaturas y ruido electromagnético, propias de los entornos agrícolas e industriales.

Durante el montaje e instalación de los tableros de control, se debe asegurar el estricto cumplimiento de las normativas de grado de protección. Específicamente, se recomienda el uso de gabinetes con grado de protección NEMA 4X, los cuales proporcionan una protección superior contra la corrosión, el polvo y los chorros de agua, factores críticos dada la exposición a la intemperie y el uso de agroquímicos en los ingenios azucareros.

Establecer un programa de mantenimiento preventivo que incluya la limpieza de los sensores de humedad y la verificación de las conexiones en los módulos de E/S del PLC. Asimismo, se sugiere la capacitación continua del personal operativo en el manejo de la interfaz de control para maximizar el aprovechamiento del recurso hídrico y la eficiencia energética del sistema.

IX. Referencias Bibliográficas

Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D., & Smith, M. (1998). *Crop evapotranspiration—Guidelines for computing crop water requirements*. FAO Irrigation and drainage paper 56. Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO).

Atlantic Group. (2024). *Tecnologías de riego avanzadas: el cuadro eléctrico PLC*. https://tech.atlanticgroup.it/es/enfoque-de-producto/tecnologias-de-riego-avanzadas-el-cuadro-electrico-plc/

Bolton, W. (2015). *Programmable logic controllers*. Newnes.

Cañón, L. E., & Restrepo, J. P. (2021). *Manual de riego y drenaje en cultivos tropicales*. Universidad Nacional de Colombia.

Castaño Giraldo, S. A. (s. f.). *Lazo abierto y lazo cerrado*. Control Automático Educación. Recuperado el 11 de diciembre de 2025, de https://controlautomaticoeducacion.com/control-realimentado/lazo-abierto-y-lazo-cerrado/

Crespo, G., Ravelo, A. C., & Díaz, A. (2019). *Manejo del riego en la agroindustria de la caña de azúcar*. Ediciones Universidad de La Habana.

Empowered Automation Solutions Inc. (2023). *What are the three types of PLC?* https://www.empoweredautomation.com/what-are-the-3-types-of-plc

Grillo, U. & Espinoza, A. (2013). *Sistema automatizado de riego y fertilización controlado por PLC LOGO 230RC para el cultivo de Maní en el Municipio de Managua, Comarca San Isidro Libertador, Comunidad Los Picones, Finca Santa Juana.* Universidad Nacional Autónoma de Nicaragua - Managua.

INCAE. (2020). *Guía de buenas prácticas agrícolas para la caña de azúcar*. Centro Latinoamericano para la Competitividad y el Desarrollo Sostenible (CLACDS).

Ladder Logic World. (s. f.). *PLC Architecture and Types: With Comparison Table*. https://ladderlogicworld.com/plc-architecture/

Mader, A. (2000). *A classification of PLC models and applications*. In *Discrete Event Systems: Analysis and Control* (pp. 239-246). Boston, MA: Springer US. https://doi.org/10.1007/978-1-4615-4493-7_24

Martínez, O., & Poveda, H. (2018). *Sistemas de control en tiempo real: Teoría y aplicaciones*. Ecoe Ediciones.

Murillo, A. (2013). *¿Qué es un PLC?* Centro de Tecnología e Innovación (CTIN). https://www.ctinmx.com/que-es-un-plc/

Namekar, S. A., & Yadav, R. (2020). *Programmable Logic Controller (PLC) and its applications*. *International Journal of Innovative Research in Technology (IJIRT)*, 6(11), 372-376.

Salazar, C. M., & López, M. I. (2017). *Fisiología y manejo del cultivo de la caña de azúcar*. Universidad Autónoma Chapingo.

Tarjuelo, J. M. (2005). *El riego por aspersión y su tecnología*. Ediciones Mundi-Prensa.

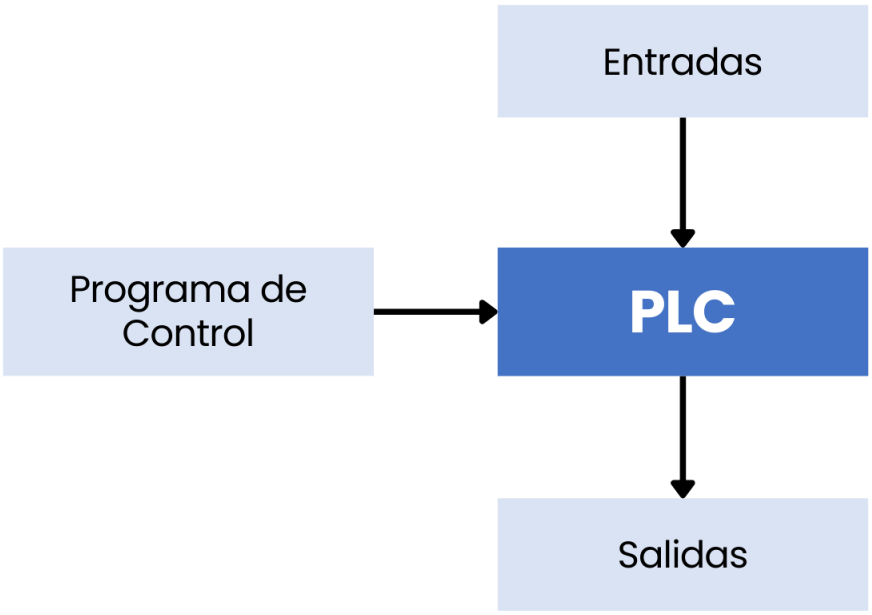
Diseño y automatización de instalaciones industriales. (s.f.). Escalado de una señal analógica. https://dyaii.es/escalado-de-una-senal-analogica/

Gútiez, I. (s.f.). Escalado de una señal analógica en TIA Portal. Programación Siemens. https://programacionsiemens.com/escalado-de-una-senal-analogica-en-tia-portal/

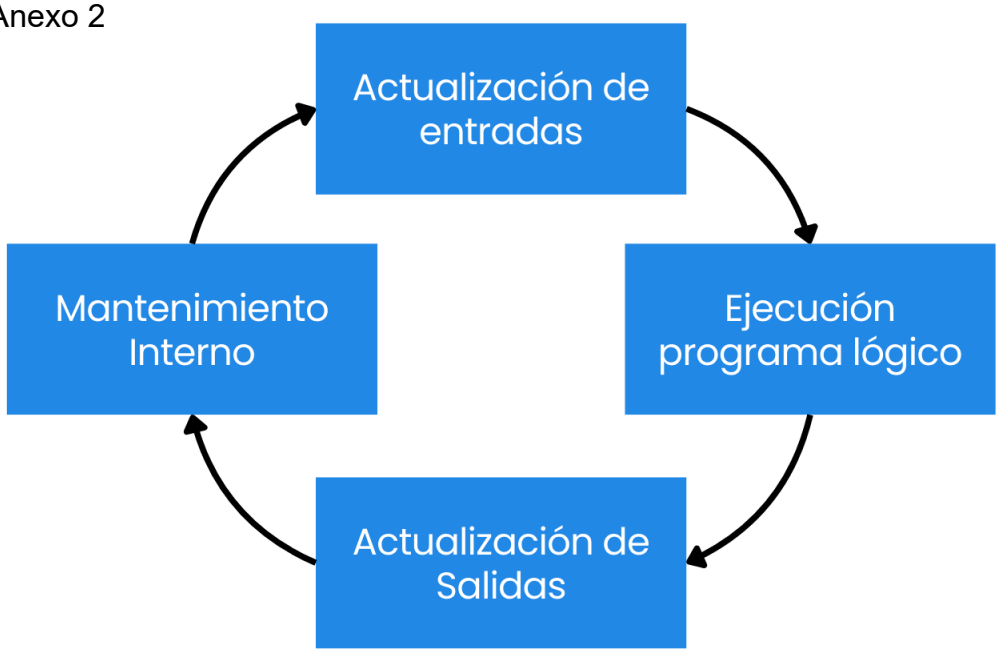
Learnchannel-TV. (s.f.). CLP – Normalizar los valores analógicos. https://learnchannel-tv.com/es/clp-2/procesamiento-de-valores-analogicos/clp-normalizar-los-valores-analogicos/

XI. Anexos

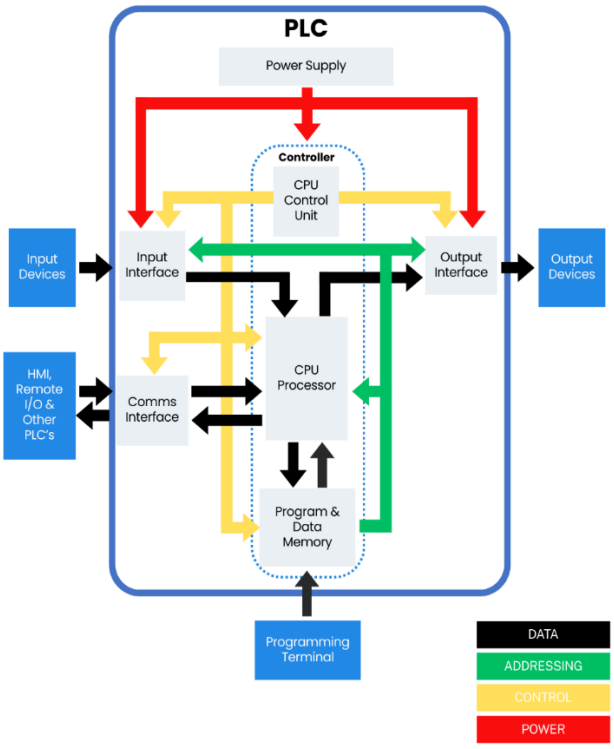
A. Anexo 1



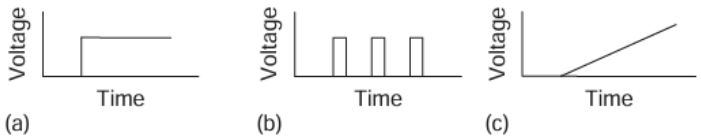
B. Anexo 2



C. Anexo 3



D. Anexo 4



E. Anexo 5

Tabla selección de equipos de presión			
Marca	Modelo	Descripción	Costo
Endress & Houser	Cerabar PMP21	Rango: 400mbar – 100bar	$320
SIEMENS	SITRANS P200	Rango: 1 a 60 bar	$255
VEGA	VegaBar 18	Rango 0 a 25 bar	$225
Yokogawa	EJA110E	Rango 0 a 137	$653

F. Anexo 6

Tabla selección de equipos de Flujo			
Marca	Modelo	Descripción	Costo
Endress & Houser	Promag W300	Rango: 0.5 m3/h a 263000 m3/h ANSI 6”	$1900
SIEMENS	FMS500	Rango: 0.5 m3/h a 253000 m3/h ANSI 6”	$1890
Yokogawa	ADMAG AXW	Rango: 0.5 m3/h a 253000 m3/h ANSI 6”	$1700

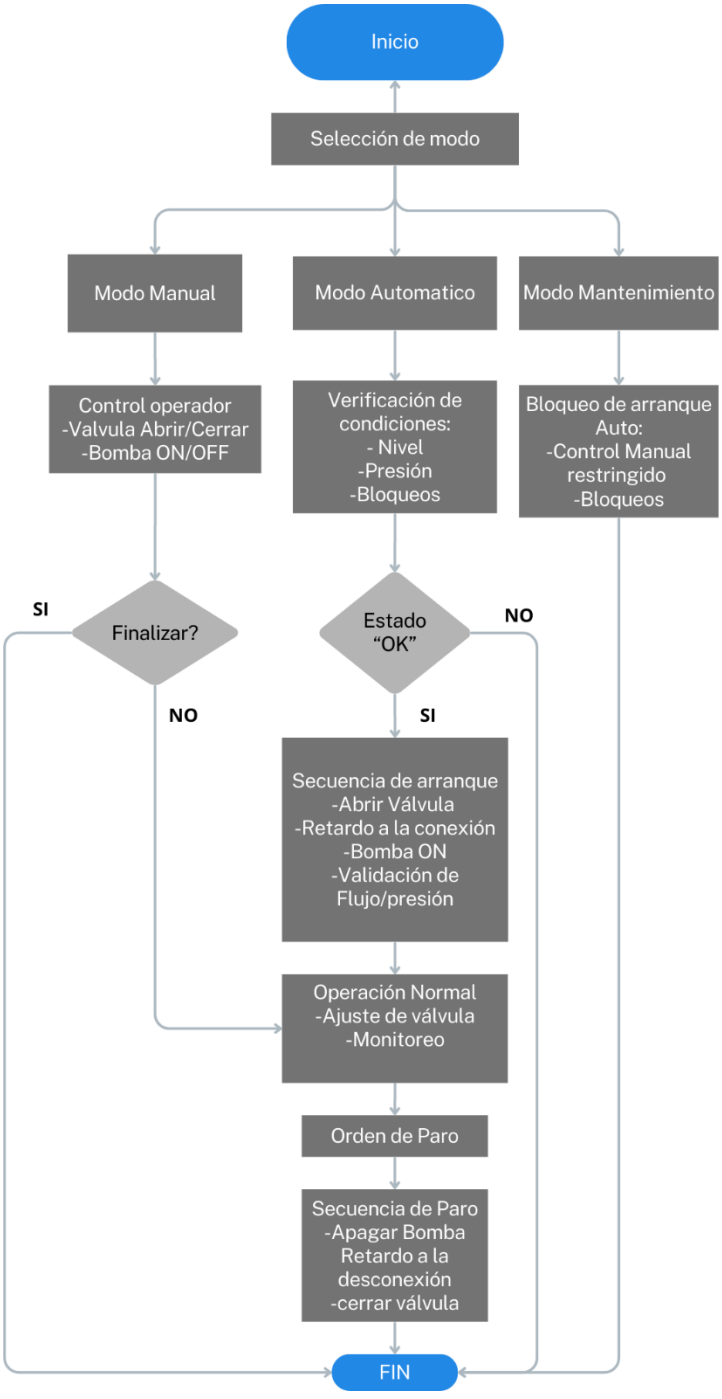
G. Anexo 7

Tabla selección de equipos de Nivel			
Marca	Modelo	Descripción	Costo
Endress & Houser	Promag W300	Rango: 0.5 m3/h a 263000 m3/h ANSI 6”	$1900
SIEMENS	FMS500	Rango: 0.5 m3/h a 253000 m3/h ANSI 6”	$1890
Yokogawa	ADMAG AXW	Rango: 0.5 m3/h a 253000 m3/h ANSI 6”	$1700

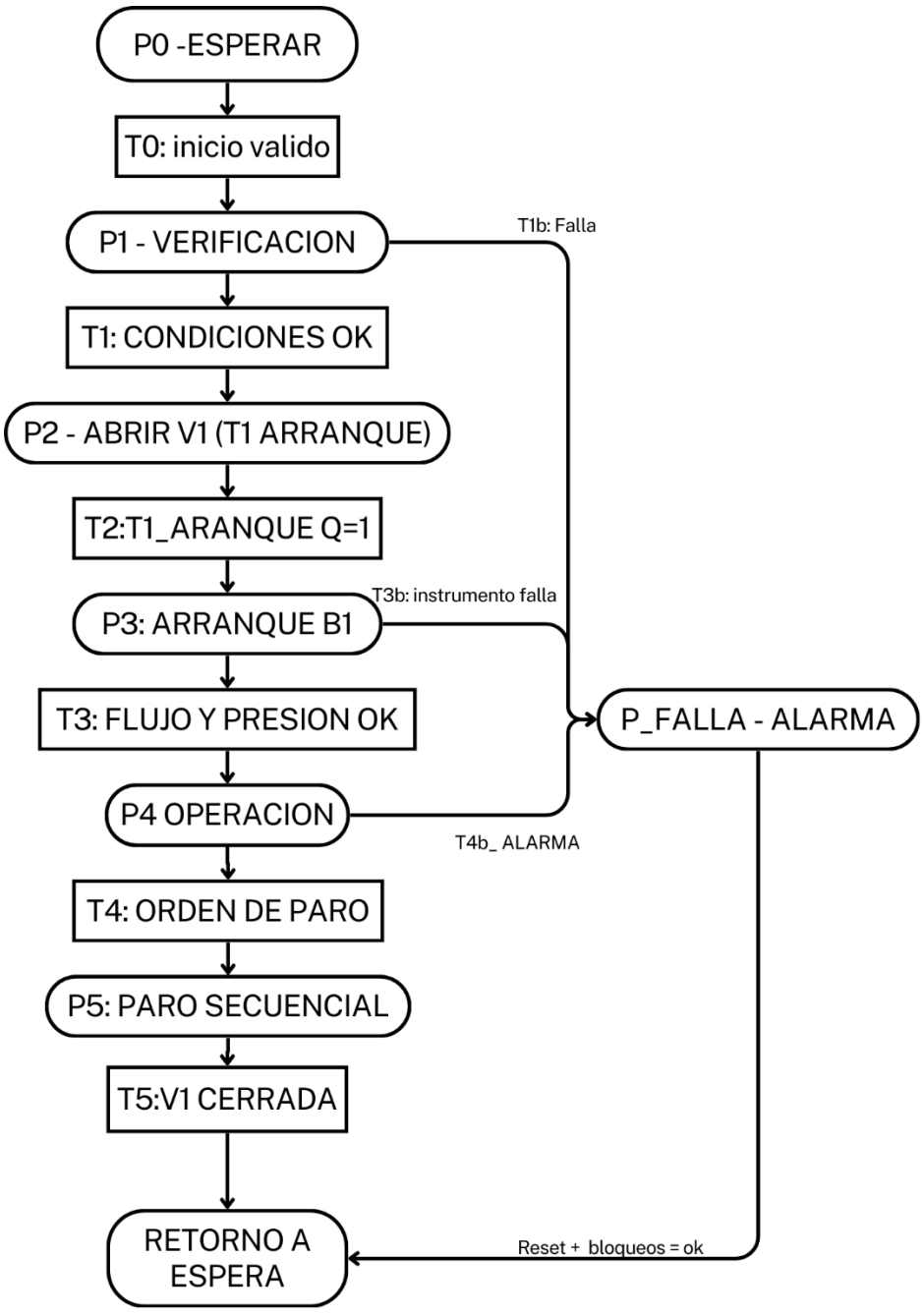
H. Anexo 8

Tabla selección de equipos de Accionamiento			
Marca	Modelo	Descripción	Costo
ABB	PSTX	Ic:30 -1250 A; 3 a 1500 HP Aplicación Bombeo	$ 2100
SIEMENS	3RW55	Ic:30 a 1500 A; 3 a 1800 HP Aplicación Bombeo	$ 1890
Schneider	Altivar ATS	Ic:17 a 1200 A; 3 a 1200 HP Aplicación Bombeo	$ 1300

I. Anexo 9


Inicio
Selección de modo
Modo Manual
Modo Automatico
Modo Mantenimiento
Control operador
-Valvula Abrir/Cerrar
-Bomba ON/OFF
Verificación de condiciones:
- Nivel
-Presión
-Bloqueos
Bloqueo de arranque Auto:
-Control Manual restringido
-Bloqueos
SI
Finalizar?
NO
Estado "OK"
NO
SI
Secuencia de arranque
-Abrir Válvula
-Retardo a la conexión
-Bomba ON
-Validación de Flujo/presión
Operación Normal
-Ajuste de válvula
-Monitoreo
Orden de Paro
Secuencia de Paro
-Apagar Bomba
Retardo a la desconexión
-cerrar válvula
FIN

J. Anexo 10


P0 -ESPERAR
T0: inicio valido
P1 - VERIFICACION
T1b: Falla
T1: CONDICIONES OK
P2 - ABRIR V1 (T1 ARRANQUE)
T2:T1_ARANQUE Q=1
T3b: instrumento falla
P3: ARRANQUE B1
T3: FLUJO Y PRESION OK
P_FALLA - ALARMA
P4 OPERACION
T4b_ ALARMA
T4: ORDEN DE PARO
P5: PARO SECUENCIAL
T5:V1 CERRADA
RETORNO A ESPERA
Reset + bloqueos = ok

K. Anexo 11

Característica	Autonics Serie TPS20	Siemens SITRANS P300	Honeywell STG800 (SmartLine)
Categoría	Industrial Básico / OEM	Proceso Industrial / Higiénico	Transmisor Inteligente de Alto Desempeño
Precisión (Base)	$\pm 0.3\%$ FS	$\pm 0.075\%$	$\pm 0.0375\%$ (Opción estándar)
Tecnología del Sensor	Piezoresistivo (Acero Inox)	Piezoresistivo / Capacitivo	Piezoresistivo de Silicio
Salida / Comunicación	4-20 mA (Analógico puro)	4-20 mA, HART, PROFIBUS PA, FF	4-20 mA, HART, DE, Honeywell Digitally Enhanced
Pantalla / Interfaz	No posee (Ajuste por potenciómetro)	Pantalla LCD con botones locales	Pantalla gráfica avanzada / Configuración remota
Material de Carcasa	Acero Inoxidable 316L	Acero Inoxidable (Diseño robusto)	Aluminio o Acero Inox (Diseño modular)
Estabilidad	Estándar industrial	0.25% por 5 años	0.015% por 10 años
Uso Ideal	Maquinaria, HVAC, Hidráulica simple.	Alimentos, Farmacéutica, Química.	Refinerías, Gas, Control crítico de procesos.

L. Anexo 12

