

**Sistema de monitoreo automatizado mediante PLC para la prevención de cavitación y
sobrepresión en equipos de bombeo**

Jhoe de Jesús Severiche Tarrifa

Director

Erik Miguel Barrios Montes, PhD.

Universidad Nacional Abierta y a Distancia - UNAD

Escuela de Ciencias Básicas, Tecnología e Ingeniería – ECBTI

Ingeniería Electrónica

2026

Agradecimientos

Agradezco primeramente a Dios por brindarme la fortaleza, la salud y la sabiduría necesarias para culminar esta etapa de mi formación profesional.

De igual manera, expreso mi agradecimiento a mis padres, hermanos, compañeros de trabajo y a mi esposa por su apoyo incondicional, motivación y acompañamiento durante todo el proceso académico y el desarrollo de este proyecto.

También agradezco al ingeniero Erik Miguel Barrios Montes por su orientación, disposición y apoyo técnico durante la realización de este trabajo de grado.

De igual manera agradezco a la empresa de acueducto de Sincelejo, a la Universidad Nacional Abierta y a Distancia (UNAD) y a todas las personas que, de una u otra manera, contribuyeron al desarrollo de este proyecto y al fortalecimiento de mi formación como ingeniero electrónico.

Resumen

Este proyecto de investigación aplicada surge de la necesidad de brindar una solución tecnológica a los desafíos del acueducto de Sincelejo, tales como las interrupciones del servicio y la gestión manual de recursos. La propuesta se centra en el diseño e implementación de un sistema automatizado basado en sensores de nivel y presión, conectados a un Controlador Lógico Programable (PLC), para permitir la visualización y el control de la red en tiempo real.

Para su desarrollo, se siguió una metodología por fases. En primer lugar, se seleccionó un pozo profundo para instalar los sensores. Luego, se procede con la implementación física del hardware y la programación del controlador lógico programable PLC, con una rutina que permitió tomar decisiones autónomas. También, se llevó a cabo una validación experimental, en la que se midió el desempeño del sistema durante un periodo de prueba para asegurar su confiabilidad.

Se obtuvieron resultados concretos y verificables durante las pruebas realizadas, evidenciando el correcto funcionamiento del sistema para la detección de condiciones de bajo nivel y sobrepresión, así como la activación oportuna de las protecciones implementadas. Con esto se busca modernizar la infraestructura y proveer herramientas de datos precisos para la toma de decisiones, además de contribuir a la continuidad y confiabilidad del servicio de agua, impactando positivamente en la calidad de vida de los habitantes de Sincelejo. De esta manera, el proyecto trasciende lo técnico y se alinea con los Objetivos de Desarrollo Sostenible, contribuyendo a un futuro más eficiente y a un acceso al agua más responsable y confiable para la comunidad.

Palabras claves: Sistema automatizado, sensor de nivel, sensor de presión, Controlador Lógico Programable, sobrepresión.

Abstract

This applied research project arises from the need to provide a technological solution to the challenges faced by the Sincelejo water supply system, such as service interruptions and manual resource management. The proposal focuses on the design and implementation of an automated system based on level and pressure sensors connected to a Programmable Logic Controller (PLC), allowing real-time monitoring and control of the network.

For its development, a phased methodology was followed. First, a deep well was selected for the installation of the sensors. Then, the physical implementation of the hardware and the programming of the PLC were carried out through a control routine that allowed autonomous decision-making. In addition, an experimental validation was performed, in which the system performance was measured during a testing period to ensure its reliability.

The results obtained during the validation tests were concrete and verifiable, demonstrating the proper operation of the system in detecting low-level and overpressure conditions, as well as the timely activation of the implemented protection mechanisms. The proposed solution aims to modernize the existing infrastructure and provide accurate data to support decision-making processes, while contributing to the continuity and reliability of the water supply service, thereby positively impacting the quality of life of the inhabitants of Sincelejo. In this way, the project goes beyond the technical scope and aligns with the Sustainable Development Goals, contributing to a more efficient future and to a more responsible and reliable access to water for the community.

Keywords: Automated system, level sensor, pressure sensor, Programmable Logic Controller, overpressure.

Contenido

Introducción	12
Concepción del Problema	13
Planteamiento del Problema.....	13
Justificación	15
Objetivos	17
Objetivo General.....	17
Objetivos Específicos	17
Marco Contextual.....	18
Antecedentes Investigativos.....	19
Marco Conceptual.....	20
Controlador Lógico Programable (PLC)	20
Sistema SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition)	20
Sensor de Presión.....	21
Sensor de Nivel por Presión Hidrostática	21
Cavitación en Bombas	21
Señal Analógica 4-20 mA.....	22
Automatización de Procesos	22
NPSH (Net Positive Suction Head)	23
Marco Teórico.....	24
Automatización en Sistemas de Acueductos	24

Instrumentación y Monitoreo de Variables Hidráulicas	24
Protección por Nivel y Presión	24
Integración de Sensores y Sistemas de Control	24
Estado del Arte.....	26
Marco Normativo.....	28
Ley 142 de 1994	28
Reglamento Técnico del Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico (RAS).....	28
Comisión de Regulación de Agua Potable y Saneamiento Básico (CRA)	28
NTC 2050 – Código Eléctrico Colombiano.....	29
IEC 61131-3.....	29
ISO 55000.....	29
Metodología del Proyecto	30
Enfoque y Diseño de Investigación	30
Implementación de la Solución.....	33
Fase 1: Identificación y Análisis de Variables del Sistema	33
Fase 2: Diseño del Sistema Automatizado.....	34
Selección y Montaje de Equipos.....	34
Controlador Lógico Programable (PLC)	34
Módulo de Entradas Analógicas	35
Sensor de Nivel por Presión Hidrostática	36
Sensor de Presión.....	37

Montaje del Sistema en el Gabinete.....	38
Alimentación del Sistema	40
Cableado de los Equipos.....	41
Conexión de Sensores.....	42
Instalación de los Equipos en la Tubería	43
Fase 3: Implementación y Validación del Sistema	45
Implementación de la Lógica de Control.....	45
Direccionamiento de Entradas Analógicas	46
Direccionamiento de Señales.....	47
Escalamiento Sensor de Nivel	49
Cálculo de Nivel	49
Escalamiento Sensor de Presión	51
Lógica de Protección por Bajo Nivel (Prevención de Cavitación)	52
Lógica de Protección por Sobrepresión	54
Integración de Protecciones en la Lógica de Control de Arranque de Bomba	56
Pruebas y Validación del Sistema.....	58
Validación de la Programación.....	59
Validación de Lectura de Sensores	59
Validación del Direccionamiento de Sensores	59
Validación de la Escalizacion de Sensores	60
Validación de Cálculo de Nivel y Presión	62
Prueba de Protección por Bajo Nivel NPSH.....	63

Prueba de Protección por Sobrepresión	68
Validación de la Lógica de Arranque	71
Conclusiones	73
Recomendaciones	75
Trabajos Futuros	75
Referencias Bibliográficas	76

Lista de Tablas

Tabla 1 <i>Antecedentes Investigativos Relacionados con el Proyecto</i>	19
Tabla 2 <i>Direccionamiento de Señales y Variables Principales Implementadas en el PLC</i>	48
Tabla 3 <i>Pruebas del Sistema</i>	588

Tabla de Figuras

Figura 1 <i>Metodología del Proyecto por Fases.</i>	331
Figura 2 <i>PLC Siemens S7-1200</i>	35
Figura 3 <i>Módulo Siemens SM 1231</i>	366
Figura 4 <i>Sensor de Nivel por Presión Hidrostática Waterpilot FMX21.</i>	377
Figura 5 <i>Sensor de Presión Cerabar T PMC21</i>	38
Figura 6 <i>Montaje de los Equipos en el Gabinete</i>	39
Figura 7 <i>Alimentación del Sistema (Fuente y UPS)</i>	40
Figura 8 <i>Conexión de Equipos (PLC y modulo analógico)</i>	41
Figura 9 <i>Conexión Entradas de Corriente</i>	42
Figura 10 <i>Instalación Sensor de Nivel</i>	43
Figura 11 <i>Instalación Sensor de Presión</i>	44
Figura 12 <i>Dispositivos Montados en TIA Portal</i>	45
Figura 13 <i>Direccionamiento de Entradas Analógicas en el PLC</i>	46
Figura 14 <i>Estructura del Bloque de Datos DB12</i>	47
Figura 15 <i>Escalización Sensor_Nivel</i>	49
Figura 16 <i>Cálculo de Nivel de Agua</i>	50
Figura 17 <i>Escalizacion Sensor de Presión</i>	52
Figura 18 <i>Calculo Protección de Nivel Parte 1</i>	53
Figura 19 <i>Calculo Protección de Nivel Parte 2</i>	54
Figura 20 <i>Lógica de Detección de Falla por Sobrepresión</i>	56
Figura 21 <i>Integración de Protecciones en la Lógica de Arranque</i>	57
Figura 22 <i>Lectura de Entradas Analógicas en el PLC</i>	59

Figura 23 <i>Direccionamiento de Sensores en el PLC</i>	60
Figura 24 <i>Escalizacion de Sensor de Nivel en el PLC</i>	61
Figura 25 <i>Escalizacion de Sensor de Presión en el PLC</i>	61
Figura 26 <i>Validación de Cálculo de Nivel</i>	62
Figura 27 <i>Validación Lectura del Sensor de Presión</i>	63
Figura 28 <i>Verificación del Nivel de Agua Sobre la Bomba</i>	64
Figura 29 <i>Verificación Calculo Protección por Bajo Nivel (No Activa)</i>	65
Figura 30 <i>Verificación de la Lógica de Control sin Fallas</i>	66
Figura 31 <i>Activación de Protección por Bajo Nivel</i>	67
Figura 32 <i>Lógica de Control Bomba Apagada por Falla_Nivel</i>	68
Figura 33 <i>Verificación de Protección por Sobrepresión</i>	69
Figura 34 <i>Activación de Protección por Sobrepresión</i>	70
Figura 35 <i>Apagado del Equipo por Protección de Sobrepresión</i>	71

Introducción

El acceso al agua potable representa uno de los servicios más importantes para el desarrollo y bienestar de la población; sin embargo, muchos sistemas de acueducto aún operan con infraestructura y tecnologías de supervisión limitadas, lo que dificulta el monitoreo continuo de variables críticas como la presión y el nivel de agua. Esta situación puede generar fallas operativas como ruptura de tuberías, daños en equipos de bombeo y disminución en la calidad del servicio prestado a la comunidad.

Frente a esta problemática, este proyecto desarrolla una propuesta de automatización orientada al monitoreo y protección de sistemas de bombeo en pozos profundos pertenecientes al sistema de acueducto de la ciudad de Sincelejo. La solución implementa tecnologías de control industrial basadas en instrumentación electrónica, sensores industriales y un Controlador Lógico Programable (PLC), permitiendo supervisar en tiempo real las condiciones de operación del sistema y actuar de manera preventiva ante posibles fallas relacionadas con cavitación y sobrepresión.

El proyecto contempla el diseño de la arquitectura del sistema, el montaje de los equipos en un gabinete de control existente, el cableado eléctrico y de instrumentación, y el desarrollo de la lógica a implementar para la activación de protecciones automáticas ante condiciones de falla, pruebas de funcionamiento y validación para verificar el correcto comportamiento del sistema.

El documento se desarrolla por fases, inicialmente se presenta el planteamiento del problema, la justificación y los objetivos. Luego se desarrolla el marco teórico y la metodología utilizada. Posteriormente, se expone el desarrollo de la solución implementada, incluyendo selección de equipos, montaje, configuración del controlador lógico, las pruebas de funcionamiento y la validación del sistema.

Concepción del Problema

Planteamiento del Problema

El acceso al agua potable es un pilar fundamental del desarrollo humano; sin embargo, los sistemas de acueducto en todo el mundo enfrentan el reto constante de modernizar una infraestructura que a menudo opera con tecnologías obsoletas (UNESCO, 2019). Esta brecha tecnológica genera una gestión ineficiente del recurso hídrico, pérdidas económicas y afecta la prestación de un servicio vital (UNESCO, 2021). En este contexto, la monitorización en tiempo real y el control automatizado se presentan no como una opción, sino como una necesidad para garantizar la sostenibilidad de estos sistemas.

En Colombia, y particularmente en el departamento de Sucre, este desafío no es ajeno. Muchos municipios dependen de sistemas de bombeo que extraen agua de pozos profundos, una solución común pero técnicamente compleja. La operación de estos sistemas requiere una supervisión constante para prevenir fallas que, al ocurrir, impactan a comunidades enteras, agravando las dificultades propias de las zonas con recursos técnicos y financieros limitados.

En Sincelejo, capital del departamento de Sucre, su acueducto depende de varios pozos profundos cuyos motores y bombas son el corazón del sistema. En la actualidad, la vigilancia de variables críticas como los niveles de agua en los pozos, la presión en las tuberías y el estado de los motores se realiza de manera manual o con sistemas desconectados entre sí. Esta falta de integración y automatización tiene consecuencias directas. Por ejemplo, si el nivel del agua en un pozo desciende peligrosamente y no se detecta a tiempo, la bomba puede trabajar en condiciones forzadas y succionar aire en lugar de agua, un fenómeno conocido como cavitación. Las consecuencias son inmediatas: daños severos en los equipos, reparaciones costosas y, lo más grave, interrupciones prolongadas en el suministro para más de 250.000 habitantes que dependen

de este servicio para su vida diaria, su salud y su bienestar.

Frente a este problema, tecnologías como los Sistemas de Control y Adquisición de Datos (SCADA) y los Controladores Lógicos Programables (PLC) se perfilan como soluciones robustas y probadas a nivel global (Paz Tadeo, J. 2024). Estos sistemas permiten la captura automática de datos, el monitoreo remoto desde una central y la ejecución de acciones correctivas de manera inmediata; por ejemplo, el apagado automático de una bomba al detectar un nivel crítico, previniendo así su destrucción por cavitación.

En este contexto, el uso de sensores industriales para la supervisión de variables críticas como nivel y presión representa una alternativa tecnológica para mejorar la operación y protección de los sistemas de bombeo. A partir de lo anterior, se da origen a la siguiente pregunta de investigación:

¿De qué manera la integración de sensores industriales en tiempo real puede optimizar la vida útil de los equipos de bombeo en acueductos urbanos?

Justificación

La implementación de un sistema automatizado para el monitoreo en tiempo real de los niveles de agua y la presión en el acueducto de Sincelejo se constituye en una estrategia crucial. Lo cual busca prevenir fallas críticas en la infraestructura de bombeo y distribución, para garantizar un suministro continuo y confiable de agua potable para la comunidad. En la operación actual, la ausencia de un control automatizado sobre estos parámetros genera riesgos operativos y económicos de gran magnitud. La evidencia técnica para la región es contundente: estudios en sistemas de acueducto latinoamericanos demuestran que hasta el 28% de las fallas en motores de bombeo son atribuibles específicamente a daños por cavitación cuando no se cuenta con un monitoreo automatizado (Pérez Barreto, R. 2004). Esta condición deriva en incrementos en los costos de mantenimiento correctivo que pueden superar el 40% anual. De manera paralela, se ha identificado que las pérdidas de agua por rupturas en tuberías, frecuentemente asociadas a variaciones de presión no controladas, pueden alcanzar entre el 20% del volumen total distribuido (Comisión de Regulación de Agua Potable y Saneamiento Básico [CRA], 2025). Este fenómeno no solo afecta la sostenibilidad del recurso hídrico, sino que también compromete severamente la eficiencia económica de la prestación del servicio.

En cuanto al impacto social de esta iniciativa es considerable, dado que más de 250.000 habitantes de Sincelejo dependen del suministro diario de agua para sus necesidades domésticas, sanitarias y económicas. Garantizar la continuidad y confiabilidad del servicio no solo beneficia directamente el bienestar de la comunidad, sino que también fortalece las capacidades técnicas de los operadores del sistema. Esto se logra al transformar el mantenimiento de un esquema reactivo a uno preventivo, optimizando los procedimientos y reduciendo de manera sustancial los tiempos de interrupción del servicio.

Por tanto, el presente proyecto propone una solución basada en la ingeniería electrónica, enfocada en el diseño e implementación de un sistema automatizado para el monitoreo y control de variables críticas en tiempo real. Para ello, se integran sensores industriales, sistemas de control automatizado y un Controlador Lógico Programable, permitiendo una operación más segura y eficiente del sistema de bombeo. Además de aportar una solución técnica a una necesidad del sector de acueducto, el proyecto fortalece la formación profesional al aplicar conocimientos de automatización, instrumentación y control en un contexto real, generando un impacto positivo tanto a nivel operativo como social.

Adicionalmente, para el desarrollo del proyecto se seleccionó un Controlador Lógico Programable (PLC) en lugar de un sistema embebido convencional, debido a que los PLC están diseñados específicamente para aplicaciones industriales que requieren alta confiabilidad, facilidad de mantenimiento y operación continua en ambientes exigentes. A diferencia de los sistemas embebidos, el PLC permite una integración más sencilla con sensores industriales de 4 a 20 mA, módulos analógicos y sistemas de comunicación, además de ofrecer mayor robustez ante fallas eléctricas y variaciones propias de entornos industriales. Esto convierte al PLC en una alternativa más adecuada para aplicaciones críticas de monitoreo y protección en sistemas de acueducto.

Objetivos

Objetivo General

Implementar un sistema de monitoreo automatizado con un controlador lógico programable, para supervisar en tiempo real los niveles de agua y la presión en tuberías, con el fin de prevenir daños por cavitación en las bombas y sobrepresión en el sistema de acueducto de Sincelejo.

Objetivos Específicos

Identificar los parámetros críticos como nivel de agua y presión óptima de trabajo mediante un análisis técnico de las especificaciones del sistema, con el fin de establecer los puntos de control esenciales para la operación segura del acueducto.

Diseñar la arquitectura del sistema de monitoreo automatizado mediante la selección e integración de sensores industriales y un controlador lógico programable, para garantizar la adquisición y procesamiento confiable de las variables del sistema.

Implementar la lógica de control en el PLC mediante programación, con el propósito de supervisar las variables de nivel y presión, y generar protecciones automáticas ante condiciones de cavitación y sobrepresión.

Marco Contextual

El presente proyecto se desarrolla en el sistema de acueducto de la ciudad de Sincelejo, Sucre, cuya función principal es garantizar el suministro continuo de agua potable a la población mediante una infraestructura conformada por pozos profundos, sistemas de bombeo y redes de distribución.

Dentro de esta infraestructura, los equipos de bombeo desempeñan un papel fundamental en la captación y transporte del agua. Sin embargo, durante su operación pueden presentarse condiciones que afectan su desempeño y vida útil, como la cavitación ocasionada por bajos niveles de agua en el pozo y las sobrepresiones generadas en la red hidráulica. Estas situaciones pueden provocar daños en bombas, motores y tuberías, afectando la continuidad del servicio y generando costos asociados al mantenimiento y reparación de los equipos.

Actualmente, la supervisión de variables críticas como el nivel de agua y la presión se realiza principalmente mediante inspecciones operativas y monitoreo local, lo que limita la capacidad de respuesta ante eventos que requieren atención inmediata. Ante esta necesidad, la automatización industrial se presenta como una alternativa que permite mejorar el monitoreo, la protección de los equipos y la toma de decisiones basadas en información en tiempo real.

En este contexto, el presente proyecto propone el diseño e implementación de un sistema automatizado basado en sensores de nivel y presión integrados a un Controlador Lógico Programable, con el propósito de detectar oportunamente condiciones de bajo nivel y sobrepresión, activar mecanismos de protección y contribuir a una operación más segura y confiable de los sistemas de bombeo del acueducto de Sincelejo.

Antecedentes Investigativos

Tabla 1

Antecedentes Investigativos Relacionados con el Proyecto

Autor(es) y año	Objetivo	Metodología	Hallazgos principales	Relevancia para el proyecto
Paz Tadeo (2024)	Implementar un sistema SCADA para el monitoreo remoto de variables críticas en estaciones de bombeo.	Investigación aplicada basada en integración de PLC, sensores industriales y comunicación GPRS para supervisión remota.	Demostró la viabilidad técnica del monitoreo remoto en tiempo real y la reducción de tiempos de respuesta ante fallas operativas.	Sustenta la importancia de integrar sistemas de automatización para mejorar la supervisión y protección de los sistemas de bombeo del acueducto de Sincelejo.
Cárdenas et al. (2023)	Desarrollar una plataforma IoT para el monitoreo de calidad y nivel del agua en sistemas de distribución.	Implementación de sensores inalámbricos conectados mediante protocolo MQTT y servicios en la nube.	Se evidenció una mejora significativa en la adquisición de datos y detección temprana de anomalías operativas.	Respalda la necesidad de capturar información en tiempo real para optimizar la gestión y el control de variables críticas.
Arias y Tarazona (2021)	Diseñar un modelo de aprendizaje automático para la predicción de eventos de cavitación en bombas hidráulicas.	Análisis de variables de vibración y presión mediante algoritmos de machine learning.	Determinaron que la cavitación puede predecirse a partir del monitoreo continuo de variables operativas.	Justifica la supervisión permanente de nivel y presión implementada en este proyecto como estrategia de prevención de fallas.
Chero Aquino (2021)	Diseñar un sistema automatizado para optimizar la operación de estaciones de bombeo.	Investigación aplicada con instrumentación industrial y automatización de procesos.	Se logró mejorar la continuidad del servicio y reducir costos energéticos asociados a la operación.	Evidencia los beneficios operativos y económicos derivados de la automatización de sistemas de bombeo.
Castro y Rodríguez (2022)	Analizar los impactos ambientales asociados a la explotación de acuíferos mediante pozos profundos.	Investigación documental y análisis técnico de sostenibilidad hídrica.	Identificaron la necesidad de implementar mecanismos de control que favorezcan el uso eficiente del recurso hídrico.	Relaciona el proyecto con los principios de sostenibilidad y gestión eficiente del agua.

Nota. Información de antecedentes de proyectos similares

Marco Conceptual

Controlador Lógico Programable (PLC)

Dispositivo electrónico robusto y programable diseñado para automatizar procesos industriales discretos o secuenciales. Opera en un ciclo continuo de escaneo (scan) que incluye la lectura de entradas (sensores), la ejecución de un programa de usuario (usualmente en lenguajes como Ladder, Function Block Diagram o Structured Text) y la actualización de salidas (actuadores). Esta arquitectura garantiza un control determinista y en tiempo real sobre máquinas y procesos, permitiendo la automatización de operaciones como el arranque/parada de motores o la apertura/cierre de válvulas con base en condiciones lógicas predefinidas (Bolaños, H. 2012). En el contexto de este proyecto, el PLC actuará como el núcleo de procesamiento local que ejecutará la lógica de control para proteger los equipos de bombeo.

Sistema SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition)

Arquitectura de software y hardware que integra la adquisición de datos en tiempo real desde dispositivos de campo (como PLCs y RTUs), su transmisión a una ubicación central mediante redes de comunicación (p. ej., Ethernet, GPRS, radiofrecuencia), y su presentación en una interfaz gráfica operativa (HMI - Human Machine Interface). Un sistema SCADA permite la supervisión global del proceso, el registro histórico de datos (datalogging), la generación de alarmas y, en algunos casos, el envío de comandos de supervisión, facilitando la toma de decisiones informadas y la gestión eficiente de sistemas distribuidos (Paz Tadeo, 2024). Este proyecto se alinea con esta arquitectura, donde el PLC cumple la función de control local y la información se consolida para supervisión.

Sensor de Presión

Transductor que convierte la magnitud física de la presión (fuerza por unidad de área ejercida por un fluido) en una señal eléctrica analógica o digital estándar (como 4-20 mA o una señal Modbus). Para sistemas de acueducto, su correcta selección (rango, precisión, material en contacto con el fluido) es crítica. Permite monitorear condiciones anómalas como sobrepresiones, que pueden causar fugas o rupturas, y subpresiones, que pueden generar cavitación o ingreso de contaminantes, siendo así un dispositivo clave para la integridad y eficiencia de la red (IEEE, 2018).

Sensor de Nivel por Presión Hidrostática

Instrumento basado en el principio físico de que la presión en un punto de un líquido en reposo es proporcional a la altura de la columna de líquido sobre ese punto ($P = \rho * g * h$). Al medir esta presión en el fondo de un tanque o pozo, se puede determinar con precisión el nivel del líquido. Es una tecnología ampliamente utilizada en acueductos por su robustez, confiabilidad y facilidad de instalación, permitiendo el monitoreo continuo de los volúmenes disponibles en pozos y tanques de almacenamiento (Endress+Hauser, 2022).

Cavitación en Bombas

Fenómeno físico destructivo que ocurre cuando la presión estática local en la entrada del impulsor de una bomba cae por debajo de la presión de vapor del líquido que se está bombeando. Esto causa la vaporización instantánea del líquido, formando pequeñas burbujas o cavidades de vapor. Cuando estas burbujas son arrastradas a zonas de mayor presión dentro de la bomba, colapsan o implosionan de manera violenta. La energía liberada en millones de estos micro colapsos genera ondas de choque que erosionan las superficies metálicas del impulsor y la carcasa, produce vibraciones severas, reduce la eficiencia hidráulica y, finalmente, conduce a

fallas catastróficas y costosas en los equipos (Pérez Barreto, R. 2004). La detección temprana mediante el monitoreo del nivel en el pozo y la presión de succión es la estrategia de prevención primaria, esta se previene manteniendo el NPSH disponible (NPSHa) siempre mayor que el NPSH requerido (NPSHr) de la bomba.

Señal Analógica 4-20 mA

Estándar predominante en la instrumentación industrial para la transmisión de información de campo. Representa el valor de una variable física (como presión o nivel) mediante una corriente eléctrica que varía proporcionalmente entre 4 miliamperios (generalmente el "cero" o valor mínimo de la escala) y 20 miliamperios (el valor máximo o "span"). Su principal ventaja es la inmunidad al ruido eléctrico y la capacidad de detectar fallas en el cableado (una corriente de 0 mA indica un circuito abierto), lo que la hace ideal para entornos industriales con equipos sensibles (National Instruments, 2025).

Automatización de Procesos

Estrategia tecnológica que consiste en la utilización de sistemas de control (como PLCs o computadores industriales), actuadores y sensores para operar maquinaria o gestionar procesos industriales con una intervención humana mínima o nula. Su objetivo principal es ejecutar secuencias de trabajo repetitivas, mejorar la precisión, aumentar la productividad y garantizar condiciones operativas seguras y estables. En el contexto de los sistemas de acueducto, la automatización permite gestionar variables críticas como niveles, presiones y estados de equipos de manera continua y confiable, transformando la operación de un modelo reactivo, basado en inspección manual, a uno preventivo y eficiente, donde la toma de decisiones se sustenta en datos en tiempo real.

NPSH (Net Positive Suction Head)

El NPSH, conocido como Altura Neta Positiva de Succión, es el parámetro que indica la energía disponible en la succión de la bomba para evitar la cavitación. Se expresa en metros de columna de líquido y representa la diferencia entre la presión absoluta en la entrada de la bomba y la presión de vapor del agua.

Marco Teórico

Automatización en Sistemas de Acueductos

La automatización en los sistemas de acueducto permite supervisar y controlar variables críticas de operación como nivel y presión, mejorando la eficiencia, confiabilidad y seguridad de los equipos. La incorporación de sensores y sistemas de control facilita la detección temprana de fallas y la ejecución de acciones preventivas que contribuyen a garantizar la continuidad del servicio.

Instrumentación y Monitoreo de Variables Hidráulicas

La medición continua de variables como nivel y presión es fundamental para la operación segura de los sistemas de bombeo. La información suministrada por los sensores permite conocer el estado del proceso en tiempo real y tomar decisiones orientadas a prevenir condiciones que puedan afectar el funcionamiento de los equipos o la integridad de las tuberías.

Protección por Nivel y Presión

Las condiciones de bajo nivel pueden provocar fenómenos de cavitación que afectan el rendimiento y la vida útil de las bombas, mientras que las sobrepresiones representan un riesgo para las tuberías y accesorios hidráulicos. Por esta razón, la implementación de sistemas de monitoreo y protección basados en nivel y presión constituye una estrategia efectiva para reducir fallas y mejorar la confiabilidad operativa.

Integración de Sensores y Sistemas de Control

La integración de sensores industriales, módulos de adquisición de datos y controladores lógicos programables permiten desarrollar sistemas de monitoreo capaces de supervisar continuamente las condiciones de operación. Esta arquitectura facilita la implementación de lógicas de control orientadas a proteger los equipos de bombeo y optimizar el funcionamiento del

sistema de acueducto.

Estado del Arte

Durante los últimos años, la gestión de sistemas de abastecimiento de agua ha experimentado importantes avances gracias a la incorporación de tecnologías de automatización, instrumentación industrial y monitoreo remoto. Estas herramientas han permitido mejorar la eficiencia operativa, optimizar el uso de los recursos hídricos y aumentar la confiabilidad de los sistemas de bombeo mediante la supervisión continua de variables críticas de operación.

Las tendencias actuales muestran una creciente implementación de sistemas basados en Controladores Lógicos Programables (PLC), plataformas SCADA y redes de sensores inteligentes para el monitoreo en tiempo real de variables como nivel, presión, caudal y estado de los equipos. Estas tecnologías facilitan la detección temprana de anomalías operativas, reducen los tiempos de respuesta ante fallas y contribuyen a la toma de decisiones fundamentadas en datos.

De igual manera, el desarrollo de soluciones basadas en Internet de las Cosas (IoT) ha permitido ampliar las capacidades de supervisión mediante la transmisión remota de información y el almacenamiento de datos en plataformas digitales. Esto ha favorecido la implementación de estrategias de mantenimiento predictivo y análisis de comportamiento operacional orientadas a mejorar la disponibilidad de los equipos y disminuir los costos asociados a fallas inesperadas.

En el ámbito de los sistemas de bombeo, las investigaciones recientes evidencian un interés creciente por la prevención de fenómenos como la cavitación y las sobrepresiones, debido a los efectos negativos que estas condiciones generan sobre la vida útil de las bombas y la infraestructura hidráulica. Como resultado, se han desarrollado diferentes estrategias de protección basadas en el monitoreo continuo de variables hidráulicas y la implementación de lógicas automáticas de control.

Aunque existen soluciones avanzadas que incorporan inteligencia artificial, análisis predictivo y monitoreo en la nube, muchas empresas prestadoras de servicios públicos continúan requiriendo sistemas robustos, confiables y de fácil implementación que permitan proteger los equipos de bombeo mediante tecnologías industriales ampliamente utilizadas. En este contexto, la utilización de PLC industriales y sensores de nivel y presión representa una alternativa eficiente para mejorar la operación de los sistemas de acueducto y reducir los riesgos asociados a condiciones críticas de funcionamiento.

El presente proyecto se enmarca en estas tendencias tecnológicas, proponiendo una solución basada en un controlador lógico programable y sensores industriales para el monitoreo y protección de equipos de bombeo del acueducto de Sincelejo. La propuesta busca contribuir a la prevención de fallas por cavitación y sobrepresión mediante una lógica de control automatizada que permita garantizar una operación más segura y confiable del sistema.

Marco Normativo

El desarrollo del presente proyecto se fundamenta en la normatividad colombiana aplicable a la prestación del servicio público de acueducto, así como en estándares técnicos relacionados con sistemas de automatización industrial, instalaciones eléctricas y gestión de activos.

Ley 142 de 1994

Establece el régimen de los servicios públicos domiciliarios en Colombia y define las responsabilidades de las empresas prestadoras para garantizar la prestación eficiente, continua y segura de los servicios de acueducto, alcantarillado y aseo. Esta norma promueve la implementación de mecanismos que permitan mejorar la calidad, confiabilidad y sostenibilidad de los sistemas de abastecimiento de agua potable (Congreso de Colombia, 1994).

La solución propuesta contribuye al cumplimiento de estos principios mediante la supervisión automática de variables críticas y la protección de los equipos de bombeo, favoreciendo la continuidad del servicio.

Reglamento Técnico del Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico (RAS)

El Reglamento Técnico del Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico (RAS) establece los criterios técnicos para el diseño, construcción, operación y mantenimiento de los sistemas de abastecimiento de agua potable en Colombia (Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio, 2017).

Dentro de este marco, la implementación de sistemas de monitoreo y control contribuye a mejorar la operación de la infraestructura hidráulica y a garantizar condiciones seguras para los equipos que intervienen en la prestación del servicio.

Comisión de Regulación de Agua Potable y Saneamiento Básico (CRA)

Es la entidad encargada de establecer lineamientos regulatorios orientados a la eficiencia, calidad y sostenibilidad de los servicios públicos de acueducto y alcantarillado. Sus disposiciones promueven la optimización de los procesos operativos y el uso eficiente de los recursos técnicos y económicos en las empresas prestadoras del servicio (CRA, 2025).

NTC 2050 – Código Eléctrico Colombiano

La Norma Técnica Colombiana NTC 2050 establece los requisitos para el diseño, instalación y mantenimiento seguro de sistemas eléctricos. Esta norma se tomó como referencia durante la instalación del PLC, los sensores, las fuentes de alimentación y el cableado asociado al sistema de automatización, garantizando condiciones adecuadas de seguridad eléctrica (ICONTEC, 2020).

IEC 61131-3

La norma IEC 61131-3 define los lenguajes de programación para Controladores Lógicos Programables (PLC) utilizados en aplicaciones industriales. El desarrollo de la lógica de control implementada en este proyecto mediante lenguaje Ladder se fundamenta en los lineamientos establecidos por este estándar internacional (IEC, 2013).

ISO 55000

La norma ISO 55000 proporciona principios para la gestión eficiente de activos físicos dentro de las organizaciones. Su aplicación busca mejorar la confiabilidad, disponibilidad y vida útil de los equipos industriales mediante estrategias orientadas al monitoreo y mantenimiento de los activos críticos (ISO, 2014).

La implementación del sistema automatizado propuesto se alinea con estos principios al contribuir a la protección y conservación de los equipos de bombeo que forman parte de la infraestructura del acueducto.

Metodología del Proyecto

El presente proyecto adopta un enfoque aplicado e ingenieril orientado a la solución de un problema real del acueducto de Sincelejo. Se basa en la ingeniería electrónica y los sistemas de control industrial para diseñar una solución práctica, robusta y escalable que prevenga daños en los equipos de bombeo.

Enfoque y Diseño de Investigación

El presente proyecto se desarrolló bajo un enfoque cuantitativo, debido a que se fundamenta en la medición, adquisición y análisis de variables físicas de proceso, específicamente nivel y presión, utilizando sensores industriales y herramientas de automatización para evaluar el comportamiento del sistema de bombeo.

De acuerdo con su finalidad, la investigación es de tipo aplicada, ya que busca dar solución a una problemática real identificada en el sistema de abastecimiento de agua del acueducto de Sincelejo mediante el diseño e implementación de una solución tecnológica basada en instrumentación y control industrial.

Respecto al diseño metodológico, corresponde a una investigación experimental, puesto que se realizó la implementación de un sistema automatizado sobre una estación de bombeo real, manipulando variables de control y evaluando el comportamiento del sistema mediante pruebas de funcionamiento y validación de resultados bajo diferentes condiciones operativas.

Asimismo, el estudio presenta un alcance descriptivo, ya que permite identificar, monitorear y describir el comportamiento de variables críticas de operación, así como verificar el desempeño de la solución propuesta para la protección de los equipos de bombeo.

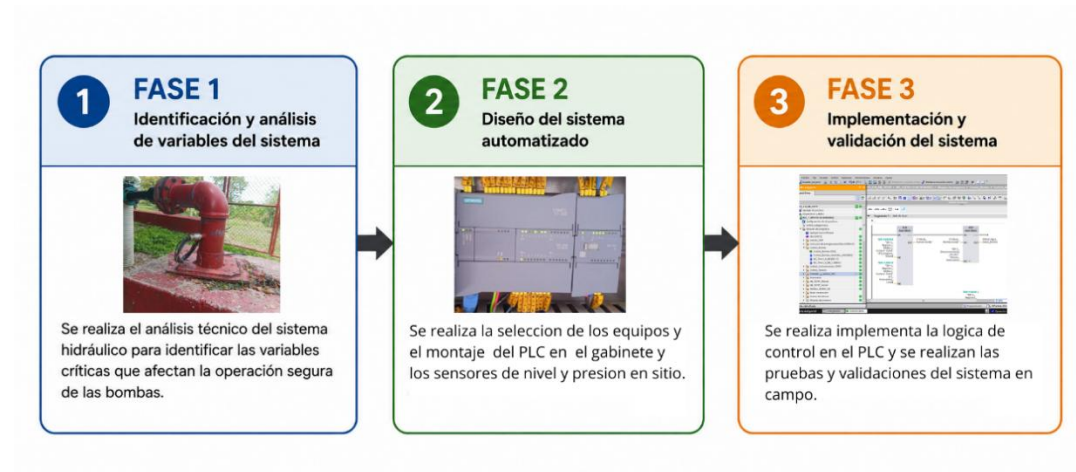
Siguiendo las recomendaciones de Garzón Agudelo et al. (2019) para la formulación de proyectos de ingeniería y Santos Valencia et al. (2020) para proyectos de investigación aplicada,

el enfoque se centra en la integración de instrumentación, automatización y lógica de protección determinista.

El diseño general del sistema sigue una arquitectura híbrida ampliamente recomendada en proyectos recientes de acueductos: el PLC actúa como núcleo de control local y protección autónoma (respuesta inmediata ante nivel crítico o presión anómala), mientras que se deja abierta la posibilidad futura de integrar un nivel SCADA o HMI para supervisión remota y registro histórico de datos. Esta aproximación evita la dependencia total de redes de comunicación y garantiza la seguridad de las bombas sumergibles incluso en caso de interrupciones.

Figura 1

Metodología del Proyecto por Fases.



Nota. Metodología utilizada para la elaboración del proyecto.

En la figura 1, se muestra la metodología desarrollada en el proceso, la cual consta de 3 fases cómo se describen a continuación.

En la fase 1 se desarrolló el análisis del sistema para poder identificar las variables críticas que pueden afectar la operación de las bombas y así lograr en la siguiente fase

seleccionar los equipos adecuados.

En la fase 2 se seleccionaron los equipos de presión y nivel adecuados, montaje y cableado de los equipos en el tablero y los sensores en sitio.

Por último, en la fase 3 se realizó la implementación de la lógica de control y las pruebas de validación del sistema.

Implementación de la Solución

Fase 1: Identificación y Análisis de Variables del Sistema

El análisis técnico del sistema de bombeo en pozos profundos se realizó teniendo en cuenta los daños más frecuentes que presentaban los equipos de bombeo, como daños en los impulsores, sellos mecánicos destruidos, desgastes los cuales conllevaron a atascamientos de los motores y las rupturas de las tuberías.

Con este análisis se evidencio que los daños más relevantes se presentan en las bombas y motores debido a la cavitación por bajo nivel por encima de la succión de la bomba, también se evidencia que el daño en las tuberías es causado por sobrepresión en la red, estos hallazgos nos llevan a implementar un sistema automatizado con sensores de presión y nivel para poder proteger los equipos y evitar daños a través de una lógica de control implementada mediante un controlador lógico programable.

El análisis de campo permitió clasificar los daños en dos categorías: hidráulicos y mecánicos. En la bomba, la cavitación genera erosión severa en el impulsor y los difusores, reduciendo la capacidad de entrega de caudal. Esta condición de trabajo forzado se transmite al motor sumergible, provocando sobrecalentamiento de los devanados, desgaste prematuro de los rodamientos y fallo de los sellos mecánicos, lo que finalmente resulta en la entrada de agua y la quema total del motor o daños en la bomba.

Desde el punto de vista funcional, el sistema opera bajo un esquema de control local, donde el PLC recibe señales analógicas provenientes de los sensores instalados en campo, las convierte en variables físicas interpretables y ejecuta una lógica de control basada en los SET POINT (es el valor deseado o de referencia que se programa en un controlador) previamente definidos por los ingenieros de producción para mantener en óptimas condiciones el sistema y

evitar daños en los equipos de bombeo en cada una de las estaciones de pozo. Esta lógica permite actuar de forma inmediata ante condiciones críticas, como niveles bajos en el pozo o presiones elevadas en la tubería.

La solución fue diseñada para ser implementada sobre un tablero de control ya existente en los pozos, lo cual permite reducir costos, aprovechar infraestructura disponible como fuentes de alimentación, sistemas de UPS, protecciones eléctricas, borna relés de protección, cableado y bornas, lo cual facilita su integración en sistemas reales, que en conjunto con el controlador y los sensores de nivel y presión ayudaran a medir, supervisar y controlar cada una de estas variables.

Fase 2: Diseño del Sistema Automatizado

Selección y Montaje de Equipos

La selección de los componentes del sistema se realizó teniendo en cuenta criterios técnicos como precisión, confiabilidad, compatibilidad con estándares industriales y facilidad de integración con sistemas de automatización existentes en el acueducto, lo cual facilita la integración con equipos existentes en sitio y la integración con los arranques de motor que están instalados en cada una de las estaciones de pozos como lo son arrancadores suaves (AS), arranque directo, arranque estrella triángulos y variadores de frecuencia (VFD).

Controlador Lógico Programable (PLC)

Debido a los acuerdos de precio de la empresa de acueducto con la marca Siemens, los cuales permiten adquirir equipos de alta tecnología a un precio muchos más bajo en comparación con otras marcas en el mercado y debido a su alta confiabilidad en aplicaciones industriales y su capacidad para gestionar procesos en tiempo real. Para el desarrollo del sistema se seleccionó el PLC Siemens S7-1200.

Este equipo fue elegido principalmente por:

- Alimentación a 24 VDC compatible con el gabinete ya existente.

- Su compatibilidad con señales analógicas estándar (4–20 mA)
- Facilidad de programación mediante el software TIA Portal
- Posibilidad de expansión mediante módulos adicionales
- Robustez en entornos industriales

El PLC actúa como el cerebro del sistema, ejecutando la lógica de control encargada de analizar las variables de proceso y tomar decisiones automáticas para la protección del sistema de bombeo.

Figura 2

PLC Siemens S7-1200



Nota. PLC utilizado en la implementación de la solución.

Módulo de Entradas Analógicas

Para la adquisición de las señales se seleccionó el módulo Siemens SM 1231, compatible con el PLC S7-1200 y diseñado para trabajar con señales analógicas de tipo 4–20 mA.

Este módulo cumple una función fundamental dentro del sistema, ya que permite convertir las señales analógicas provenientes de los sensores (nivel y presión) en valores digitales que pueden ser procesados por el PLC. Sin esta conversión, el controlador no podría interpretar las variables físicas del proceso. El cual nos ofrece:

- **Precisión y medición:** Con más de 16 bits de y mediciones diferenciales lo que reduce el

ruido de fondo.

- Diagnóstico y Protección: Capacidad de detección de rotura de hilo (solo en el rango de 4-20 mA) y diagnóstico de rebase.
- compatibilidad con señales analógicas estándar (4–20 mA)
- Facilidad de programación mediante el software TIA Portal
- Montaje: Se conectan directamente a la derecha de la CPU S7-1200, permitiendo una fácil expansión del sistema.

Figura 3

Módulo Siemens SM 1231



Nota. Modulo utilizado en la implementación de la solución.

Sensor de Nivel por Presión Hidrostática

Para la medición del nivel del agua se seleccionó la sonda Waterpilot FMX21 Endress+Hauser, la cual opera bajo el principio de presión hidrostática.

Este equipo fue elegido principalmente por:

- Capacidad de medición en pozos profundos (Hasta 100 mH₂O).

- Su salida estándar de 4-20 mA
- Alta precisión y estabilidad en la medida.
- Diseño resistente a condiciones de inmersión y su forma alargada la cual facilita su ingreso

en la tubería existente.

Figura 4

Sensor de Nivel por Presión Hidrostática Waterpilot FMX21.



Nota. Sonda utilizada en la implementación de la solución.

Sensor de Presión

Para el monitoreo de la presión en la tubería se seleccionó el sensor Cerabar T PMC21 Endress+Hauser, con un rango de operación de 0 a 150 psi.

Este equipo fue elegido principalmente por:

- Ofrece una salida de corriente de 4-20 mA.

- Su tamaño y fácil instalación en niple de ½" NTP.
- Rango de medición y robustez del encapsulado.
- Tecnología que utiliza una celda de medición cerámica y seca.

Figura 5

Sensor de Presión Cerabar T PMC21



Nota. Sensor de presión usado en la implementación de la solución.

Montaje del Sistema en el Gabinete

El sistema fue instalado en un tablero de control previamente existente en el pozo profundo. Esta decisión permitió optimizar recursos para la puesta en marcha del proyecto y facilitar la integración con el sistema actual. El PLC S7-1200 y el módulo de entradas analógicas SM1231 se montaron sobre riel DIN dentro del gabinete, asegurando:

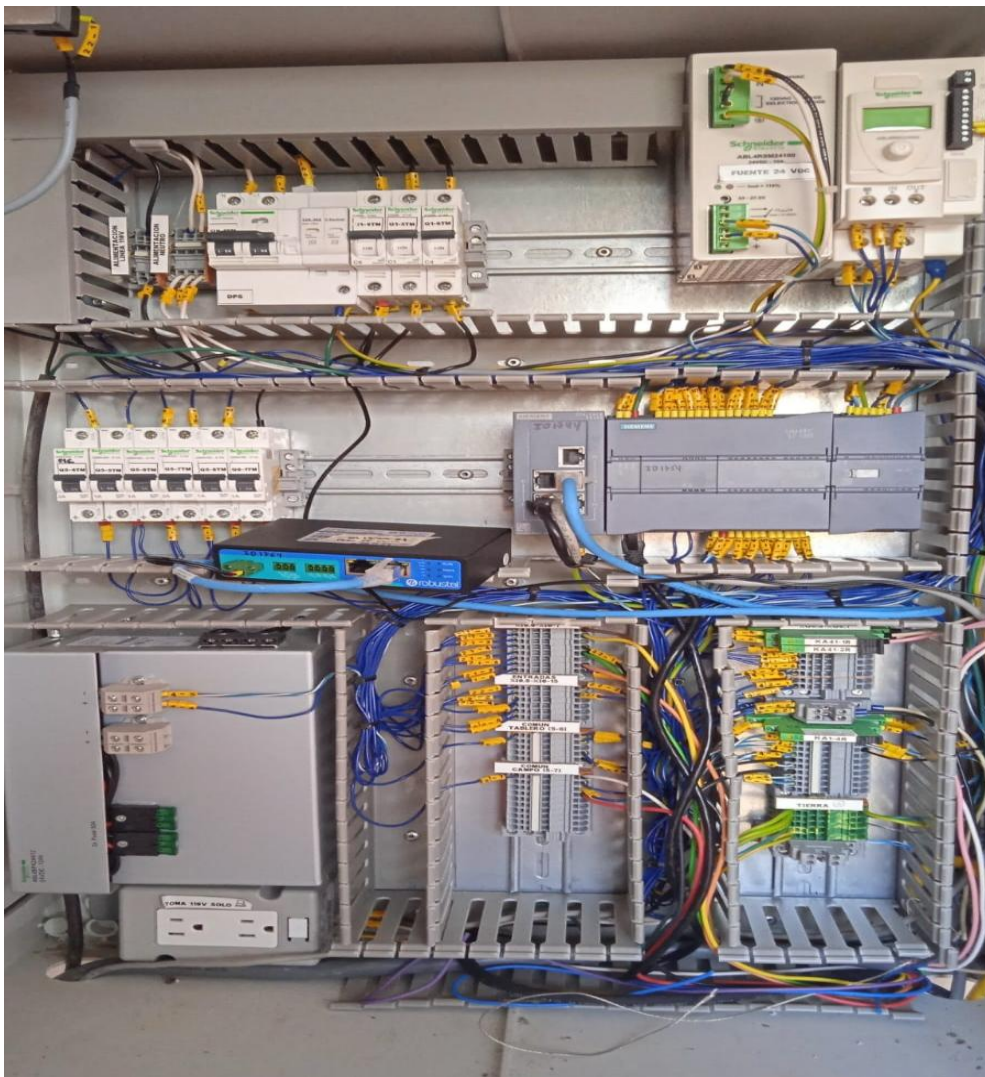
- Fijación mecánica adecuada.

- Organización del sistema y conexionado con el cableado existente.
- Acceso sencillo para el mantenimiento de los equipos.

Para el montaje de los equipos se respetaron las normas básicas de instalación eléctrica, incluyendo la separación entre circuitos de potencia y control, así como el uso de canaletas para la distribución ordenada del cableado, las protecciones eléctricas tanto en corriente AC como en DC.

Figura 6

Montaje de los Equipos en el Gabinete



Nota. Distribución de los componentes en el gabinete.

Alimentación del Sistema

Los equipos se alimentaron con la fuente de 24 VDC y el sistema UPS existente en el gabinete lo cual es el rango de voltaje más utilizado en sistemas de automatización industrial con lazos de corriente 4-20 mA, ya que este tipo de alimentación asegura un funcionamiento estable del sistema y reduce el riesgo de daño en los equipos por variaciones eléctricas, cada una de estas conexiones se realizó respetando y asegurando:

- La polaridad de positivo y negativo desde la fuente hasta los equipos.
- Las protecciones eléctricas como breakers y DPS.
- Conexiones firmes y seguras con el torque necesario para evitar conexiones flojas y puntos calientes.
- Conexión de puesta a tierra a cada uno de los equipos.

Figura 7

Alimentación del Sistema



Nota. Fuente de tensión y sistema UPS.

Cableado de los Equipos

La conexión de los equipos se realizó teniendo en cuenta el manual de cada uno de ellos, la alimentación del PLC y el módulo analógico se cableo desde las bornas de 24 VDC y 0 VDC existentes en el gabinete, el cableado se organizó separando las señales de control de las de alimentación, lo que permitió que cada uno de los equipos tenga su propio fusible de protección.

Las entradas del PLC se conectaron con cable hasta las bornas de paso en las cuales se cablearon la señal de encendido de bomba y la señal que indica en qué modo se encuentra trabajando la estación. Por otro en la salida del PLC se colocó el relé que conecta la señal de mando o arranque de bomba, este relé también es alimentado a 24 VDC lo que permite que en sus contactos auxiliares se manejen arranques de cualquier rango de voltaje, lo que ayudara a la implementación en los demás pozos que tengan un sistema de arranque diferente al que se montó el cual es un arrancador suave de la marca siemens.

El módulo SM1231 se acopla del lado derecho del PLC, como se muestra en la Figura 8 y se conectan en las entradas 0 y 1 los sensores de nivel y presión respectivamente, ya que se conecta directamente no necesita cableado adicional para comunicarse con el PLC.

Figura 8

Conexión de Equipos



Nota. Conexión de los equipos en el tablero

Conexión de Sensores

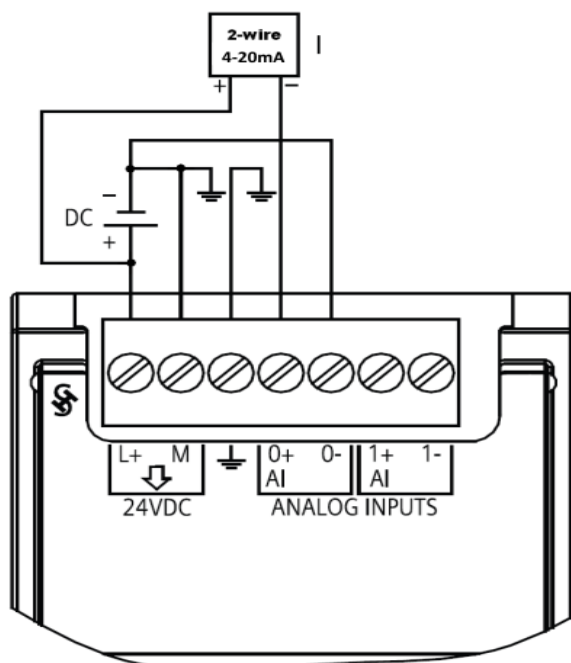
La conexión de los sensores de nivel y presión se realiza al módulo analógico mediante señales de corriente de 4-20 mA. La distribución de entradas se realizó de la siguiente manera:

- Entrada AI0: Sensor de nivel
- Entrada AI1: Sensor de presión
- Entrada AI2 y AI3: Disponibles

Cada sensor se cableo respetando la polaridad de un lazo de corrientes, es decir, que el terminal positivo de los sensores se conectó a 24VDC mientras que el otro terminal negativo o retorno se conectó a la entrada del módulo analógico como se muestra en la Figura 9, lo que garantiza el correcto funcionamiento de los sensores y también evita daños en los equipos por mala conexión.

Figura 9

Conexión Entradas de Corriente



Nota. Conexiones eléctricas módulo de entradas analógicas. Tomado de “¿Cómo se conecta un sensor a los módulos de señal analógica del S7-1200, S7-1500 y del ET 200MP?”, Siemens AG

(2020). <https://support.industry.siemens.com/cs/document/40913432/%C2%BFc%C3%B3mo-se-conecta-un-sensor-a-los-m%C3%B3dulos-de-se%C3%B1al-anal%C3%B3gica-del-s7-1200-s7-1500-y-del-et-200mp-?dti=0&lc=es-CO>

Instalación de los Equipos en la Tubería

La instalación de la sonda de nivel se realizó como se muestra en la Figura 10. En la que se baja el equipo por una tubería de 1 ½” de diámetro la cual está instalada cerca a la bomba sumergibles, es decir, a un metro por encima de la succión de la bomba, estos valores de instalación de sonda varían de pozo a pozo dependiendo la profundidad de instalación del equipo de bombeo.

Figura 10

Instalación Sensor de Nivel



Nota. Sonda instalada en la tubería PVC para nivel.

Este valor de profundidad de instalación de la sonda se mide para ser utilizado en el cálculo de protección por nivel, ya que con este y la capa de agua por encima del sensor se logra calcular a que profundidad está el nivel dinámico del pozo.

Por otro lado, la instalación del sensor de presión se realiza en un niple de $\frac{1}{2}$ " que se encuentra a la misma altura de la tubería de nivel, este niple de aproximadamente 10 cm se encuentra soldado a boca de pozo y por medio de un acople galvanizado de $\frac{1}{2}$ " se conecta el sensor tipo tabaco como se muestra en la Figura 11. Esta conexión se realiza con llaves de tubo y cinta teflón para evitar fugas en el equipo.

Figura 11

Instalación Sensor de Presión



Nota. Sensor de presión conectado a proceso.

Fase 3: Implementación y Validación del Sistema

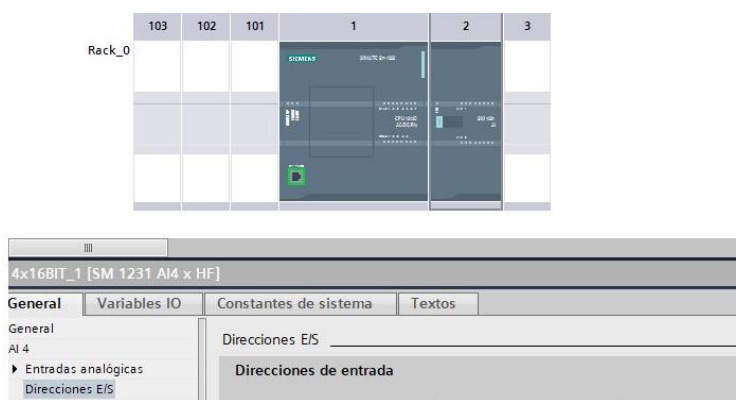
Implementación de la Lógica de Control

La lógica de control del sistema fue desarrollada en lenguaje Ladder con la ayuda del software de Siemens TIA Portal, el cual permite la programación de PLCs S7 1200. Para el procesamiento de las señales 4-20 mA proveniente de los sensores de presión y nivel, se implementa una estructura organizada por etapas las cuales permiten manejar de forma adecuada cada uno de los datos de entrada, procesarlos, calcular los valores y compararlos con los SET POINT establecidos para lograr una toma de decisiones más eficaz en el control y protección de los equipos de bombeo.

La configuración inicia eligiendo el PLC y el módulo SM1231, esto se puede lograr buscando los equipos uno a uno por el código que tienen en la parte frontal o leyéndolos desde el software y este nos arroja los equipos instalados, una vez realizado este proceso los equipos aparecen montados en el Rack como se muestra en la Figura 12.

Figura 12

Dispositivos Montados en TIA Portal



Nota. Configuración de equipos en el software.

Direccionamiento de Entradas Analógicas

En la primera etapa se realiza el direccionamiento de las señales de nivel y presión provenientes de los sensores instalados en campo y conectados al módulo de entradas analógicas, asignando cada canal a una variable interna dentro del sistema, esto se configura en el bloque FC8 en el árbol de programa principal.

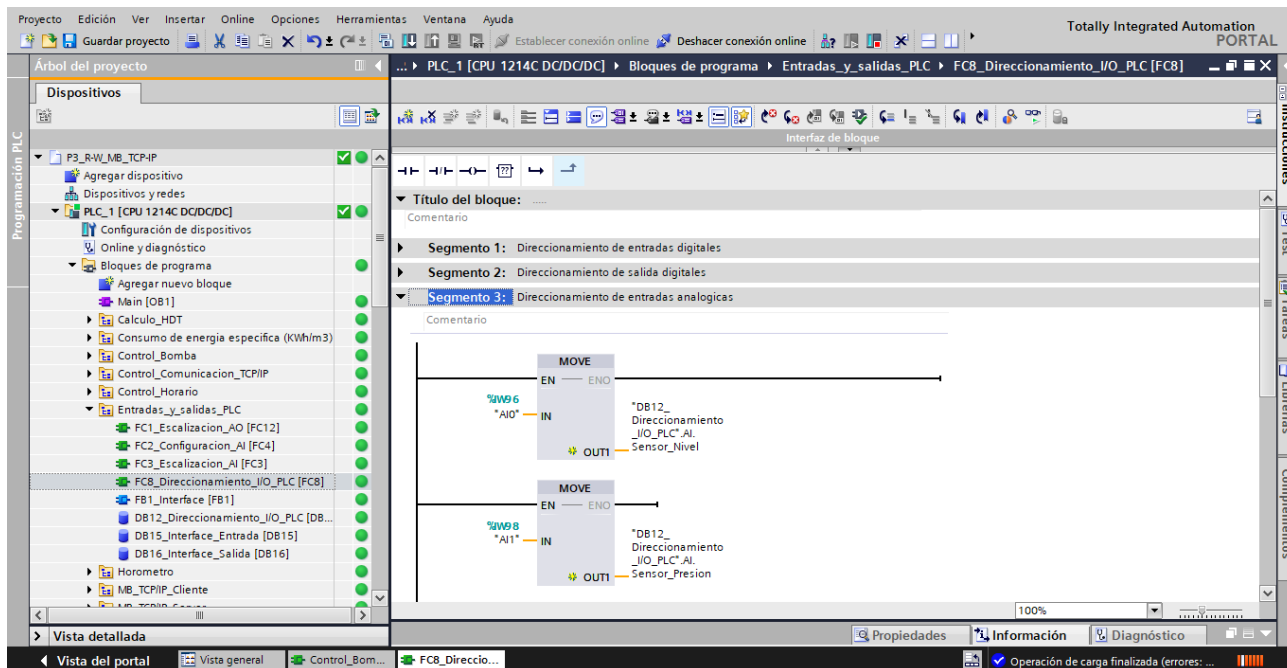
Para estas entradas se configuraron las siguientes direcciones:

- %IW96 (AI0): Sensor de nivel
- %IW98(AI1): Sensor de presión

Estas señales son transferidas mediante instrucciones tipo MOVE hacia un bloque de datos DB12 donde se almacenan para su posterior tratamiento como se puede observar en la Figura 13.

Figura 13

Direccionamiento de Entradas Analógicas en el PLC



Nota. Configuración de entradas analógicas en TIA Portal.

Direccionamiento de Señales

Como se muestra en la Figura 14 en el bloque DB12 de direccionamiento las señales son definidas y almacenadas, también se definen las variables correspondientes a las entradas analógicas del sistema.

Entre las variables principales tenemos:

- Sensor_Nivel de tipo entero
- Sensor_Presion de tipo entero
- Presion_Hidrostatica de tipo real

Figura 14

Estructura del Bloque de Datos DB12

The screenshot displays the configuration of the DB12 data block in the SIMATIC Manager software. The main window shows a table with the following columns: Nombre, Tipo de datos, Valor de arranque, Remanente, Accesible desde, Escritura, Visible en, Valor de arranque, and Comentario. The table contains 10 rows of data:

Nombre	Tipo de datos	Valor de arranque	Remanente	Accesible desde	Escritura	Visible en	Valor de arranque	Comentario
1 -> Static								
2 -> DI	Struct							
3 -> DQ	Struct							
4 -> AI	Struct							
5 -> Sensor_Nivel	Int	0						
6 -> Sensor_Presion	Int	0						
7 -> Sensor_Temperatura	Int	0						
8 -> Frec_Trabajo_VDF	Int	0						
9 -> AO	Struct							
10 -> Presion_Hidrostatica	Real	0.0						

The project tree on the left shows the hierarchy: Dispositivos > PLC_1 [CPU 1214C DC/DC] > Bloques de programa > Entradas_y_salidas_PLC > DB12_Direccionamiento_I/O_PLC [DB12]. The status bar at the bottom indicates 'Operación de carga finalizada (errores: ...)'.

Nota. Configuración del bloque DB12 en el software.

El uso de bloques de datos como el DB12 ayudan a centralizar la información, facilitando

la organización, el mantenimiento del código y la escalabilidad del proyecto.

En la Tabla 2 se organizan y se detallan las variables principales usadas en la lógica de control, las cual muestra una descripción breve de cada una de ellas.

Nota: En siemens W significa palabra y es el espacio de memoria como se observa en %IW96 y %IW98 y se lee como una palabra (Word) de 16 bits. Cada entrada analógica ocupa una palabra (2 bytes) en la memoria del PLC.

Tabla 2

Direccionamiento de Señales y Variables Principales Implementadas en el PLC

Tipo	Dirección Física	Tag / Variable	Tipo de Dato	Descripción	Origen / Función
Entrada Analógica	%IW96 (AI0)	Sensor_Nivel	INT	Señal de campo 4-20 mA del sensor de nivel	Módulo SM 1231 Canal 0
Entrada Analógica	%IW98 (AI1)	Sensor_Presion	INT	Señal de campo 4-20 mA del sensor de presión	Módulo SM 1231 Canal 1
Data Block	DB12	Sensor_Nivel Sensor_Presion Presion_Hidrostatica	INT / REAL	Almacenamiento temporal de señales analógicas	Bloque de datos intermedio
Data Block	DB14	Nivel Nivel_Sobre_Bomba Presion_mca	REAL	Variables de proceso calculadas	Nivel dinámico y presión en m.c.a.
Data Block	DB14	SET_Falla_Nivel_NPSH SET_Sobrepresion	REAL	Setpoints configurables	Umbrales de protección
Marcas Internas	M / Bit interno	FALLA_Bajo_Nivel BIT_Falla_Nivel	BOOL	Bandera de falla por bajo nivel (cavitación)	Lógica de protección
Marcas Internas	M / Bit interno	FALLA_Sobrepresion	BOOL	Bandera de falla por sobrepresión	Lógica de protección
Salida Digital	%Q	Salida a relé de arranque	BOOL	Comando de encendido/apagado de la bomba	Control del motor
Entrada Digital	%I	Modo Automático / Manual Pulsador de arranque	BOOL	Señales de control manual y modo	Entradas al PLC de 24 VDC

Nota. Direccionamiento de señales y variables en el PLC.

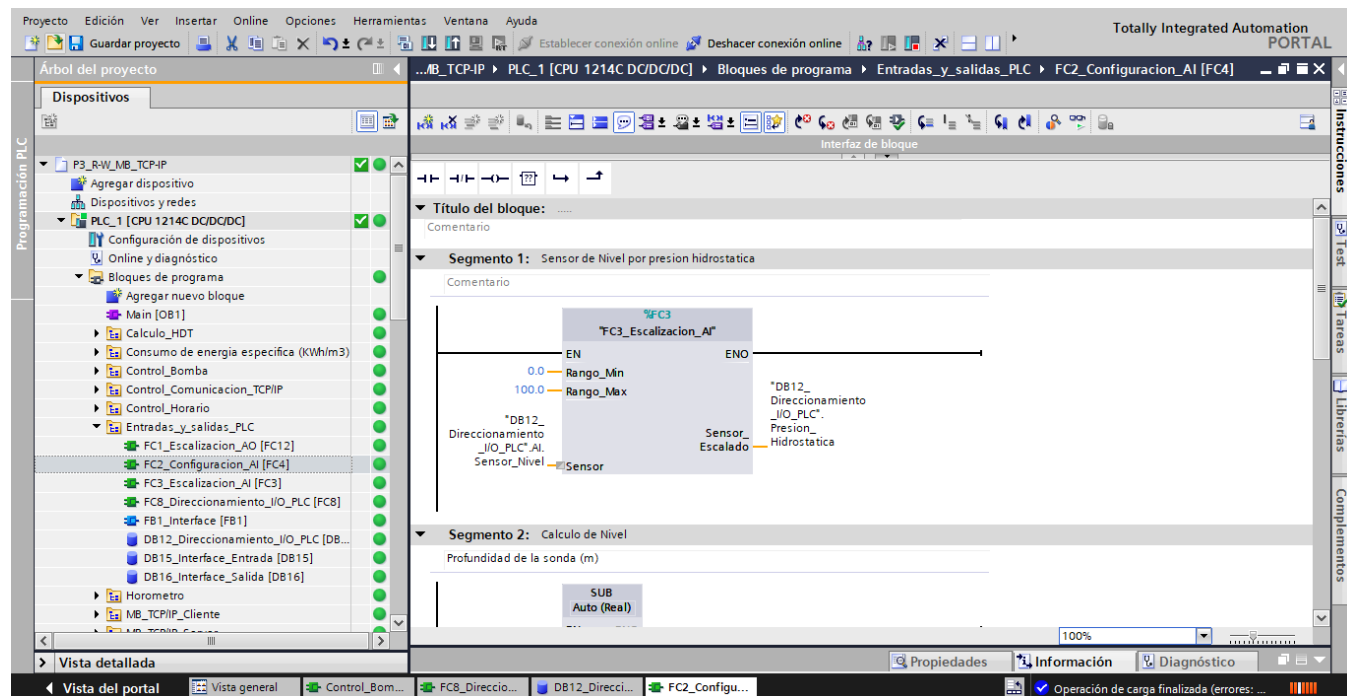
Escalamiento Sensor de Nivel

Una vez direccionadas las señales, se realiza el proceso de escalamiento de cada una de ellas, este proceso consiste en convertir los valores digitales leídos por el PLC en unidades físicas reales, en la Figura 15 podemos observar el escalamiento del sensor de nivel.

Para esto se utilizó una función de escalamiento FC3 donde se definieron los rangos de la variable Sensor_Nivel de tipo entero desde 0 hasta 100 metros, luego este bloque a la salida nos da un valor de tipo real el cual llamamos Presion_Hidrostatica y es este el que utilizaremos más adelante en otras etapas del proceso.

Figura 15

Escalizacion Sensor_Nivel



Nota. Configuración de la escalizacion de sensores.

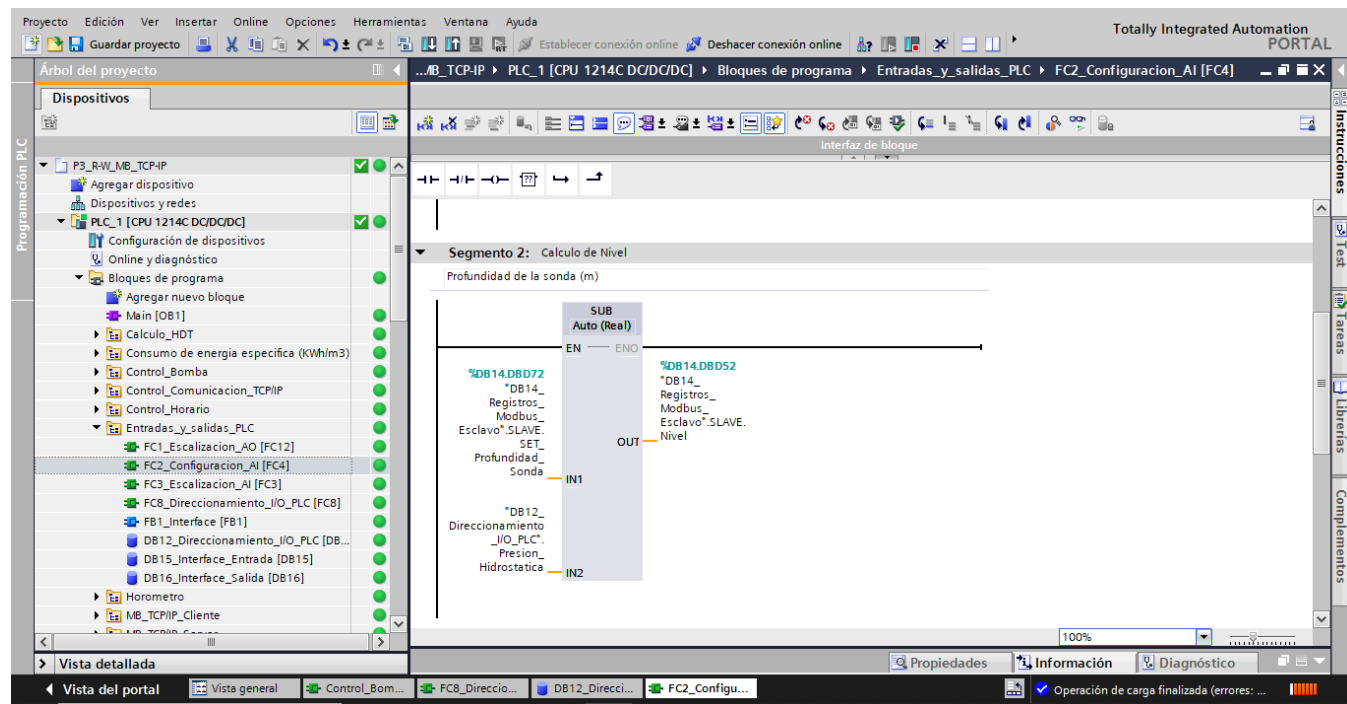
Cálculo de Nivel

Una vez calculada la Presion_Hidrostatica se realiza el cálculo de nivel como se observa

en la Figura 16, el cual se realiza con la ayuda de un bloque de operación matemática SUB, este en su interior realiza una resta de sus entradas, es decir, resta el valor de profundidad de sonda que es la distancia a la que se encuentra instalado el sensor de presión, menos la Presion_Hidrostatica o capa de agua medida por el sensor y a su salida nos entrega la variable Nivel que se da en metros y es la que indica el nivel dinámico si el pozo esta encendido o nivel estático si el pozo esta apagado, este valor es guardado en el DB14 que es una tabla en base de dato, en la que se encuentran los datos organizados de manera que puedan ser leídos con facilidad.

Figura 16

Cálculo de Nivel de Agua



Nota. Configuración del cálculo de nivel.

Escalamiento Sensor de Presión

Para el procesamiento de la señal del sensor de presión, se implementó un bloque de escalamiento que permite convertir los valores analógicos leídos por el PLC en unidades físicas reales, específicamente en metros de columna de agua (m.c.a).

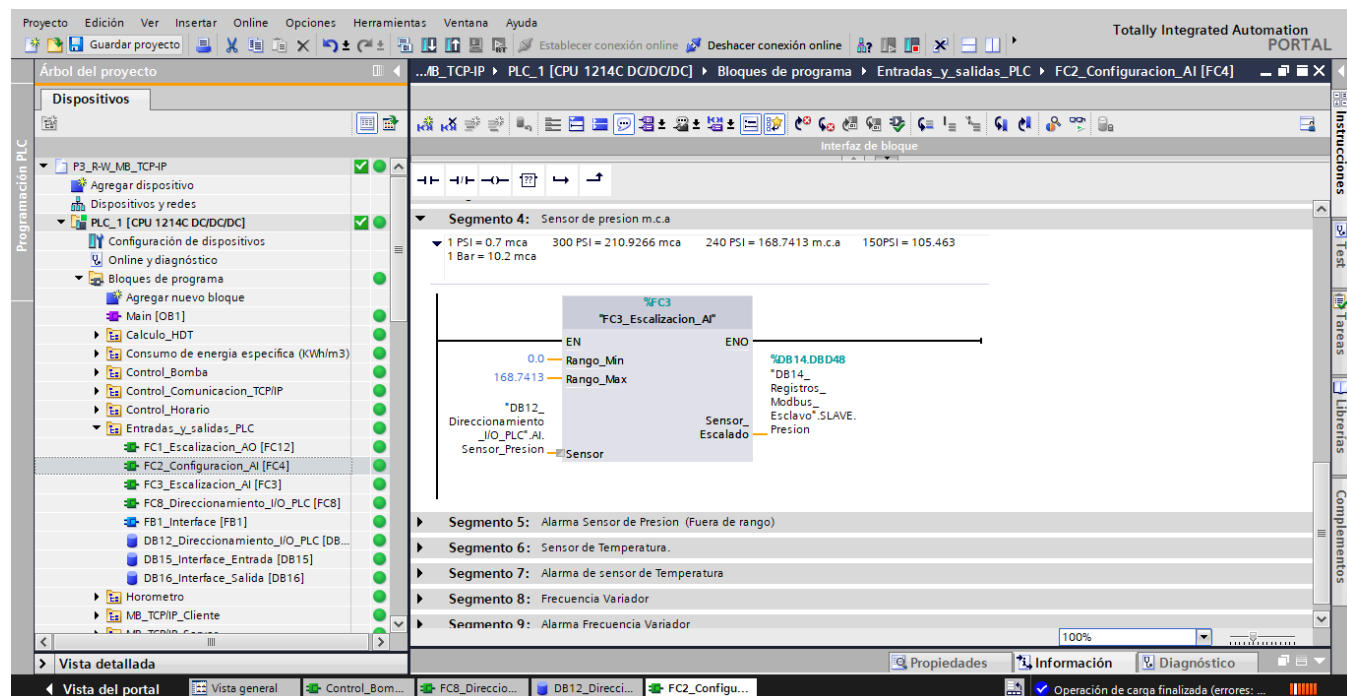
El sensor utilizado tiene un rango de medición de 0 a 240 psi, por lo que fue necesario realizar la conversión a unidades más adecuadas para el análisis hidráulico del sistema. Para ello, se utilizó la relación:

- 1 PSI = 0.703 m.c.a

De esta manera el rango máximo del sensor es de aproximadamente 168.74 m.c.a. El escalamiento se realiza mediante el bloque de función FC3_Escalizacion_AI, como muestra la Figura 17, donde:

- Rango mínimo = 0.0 m.c.a
- Rango máximo: 168.74 m.c.a
- Entrada: Señal analógica del sensor de presión
- Salida: Valor escalado en unidades físicas

Figura 17

Escalizacion Sensor de Presión

Nota. Configuración del rango del sensor de presión.

Este proceso es fundamental, ya que permite que el sistema interprete correctamente la presión real en la tubería, facilitando la implementación de alarmas y protecciones ante condiciones de sobrepresión.

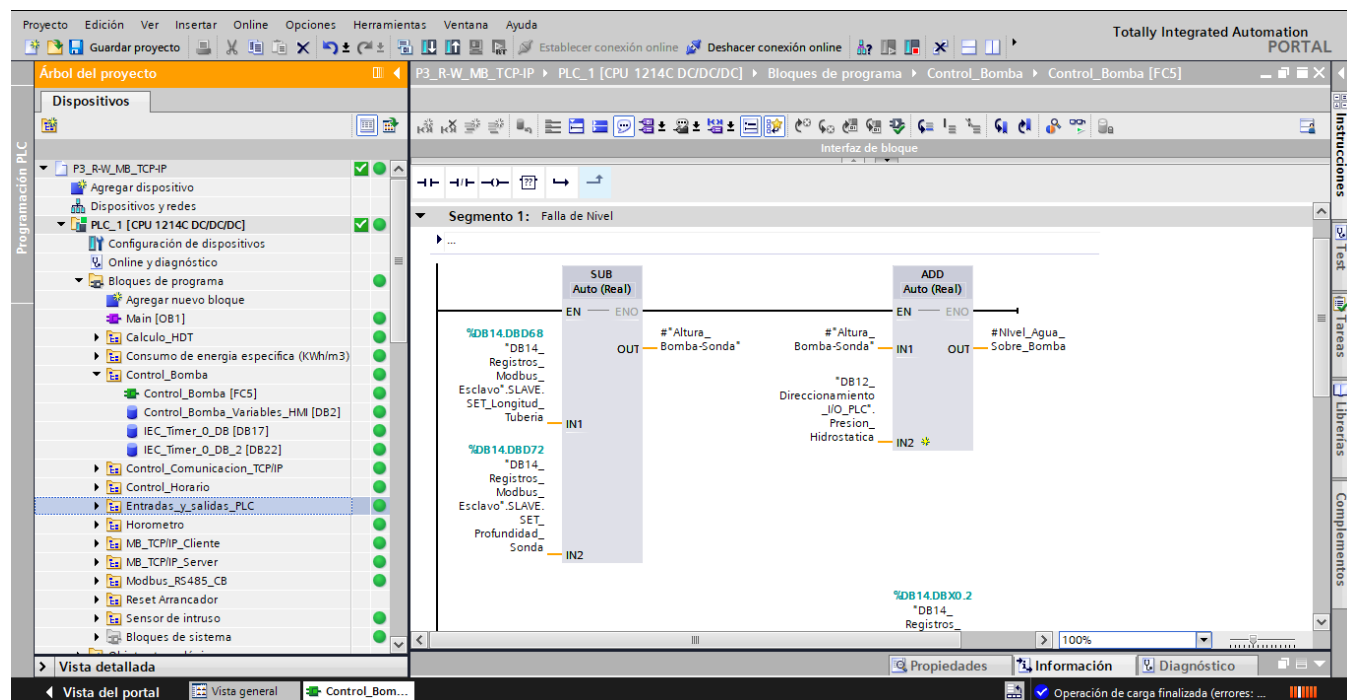
Lógica de Protección por Bajo Nivel (Prevención de Cavitación)

Con el fin de proteger el sistema de bombeo ante condiciones de cavitación, se implementó una lógica de control basada en el monitoreo del nivel de agua en el pozo, utilizando como referencia el concepto de nivel mínimo requerido para la operación segura de la bomba (NPSH). En la Figura 18 se muestra cómo se realiza el cálculo de la diferencia en metros entre la profundidad de la bomba y la instalación del sensor de nivel por presión hidrostática, mediante una operación de resta (SUB) y posterior suma (ADD), se obtiene la variable denominada nivel

de agua sobre la bomba, la cual representa la altura efectiva de líquido disponible o nivel de agua sobre la bomba para la succión.

Figura 18

Calculo Protección de Nivel Parte 1



Nota. Primera parte del calculo de nivel de agua.

Posteriormente, este valor es comparado con un umbral mínimo configurado en el sistema (SET_Falla_Nivel_NPSH), el cual representa el nivel mínimo requerido para evitar la cavitación.

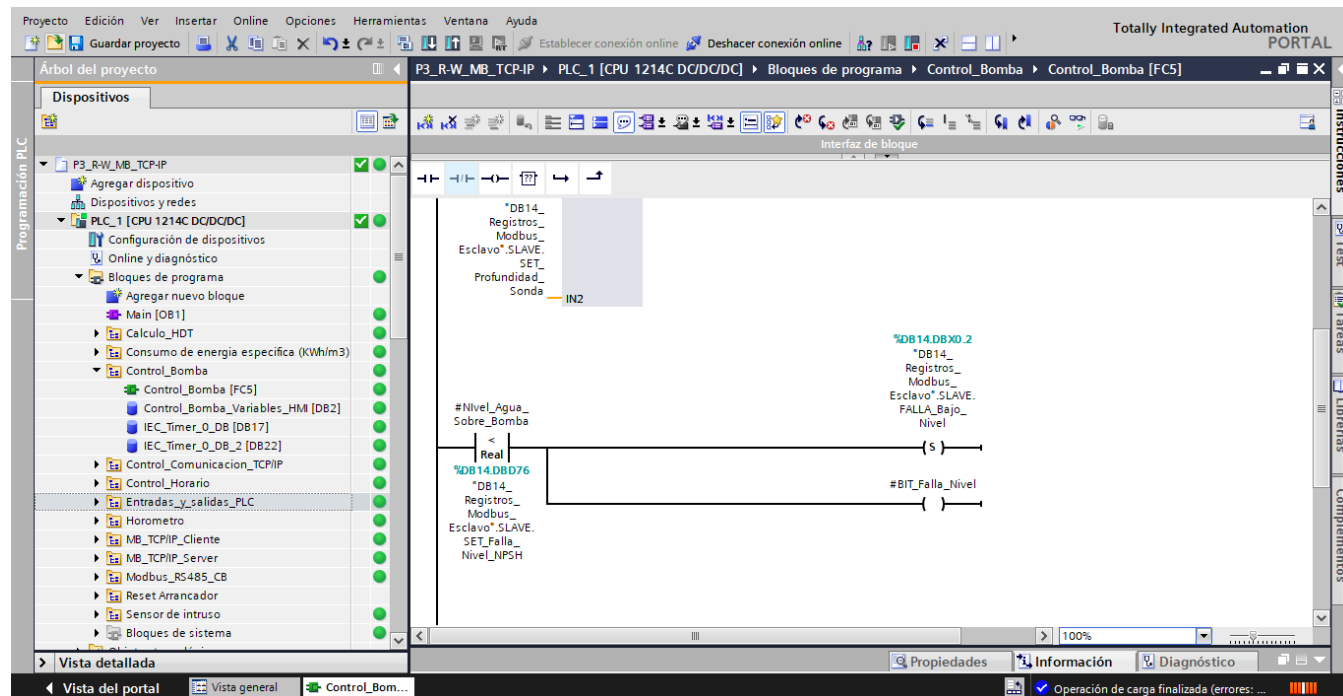
Cuando el nivel calculado es inferior a este valor, el sistema genera una condición de protección por bajo nivel, como se muestra en la Figura 19 en la cual se compara que el nivel de agua por encima de la bomba, sea mayor al SET de falla de nivel NPSH establecido, es decir que si este valor baja del SET de protección la señal de falla se encenderá.

Al cumplirse esta condición:

- Se activa una marca de falla (FALLA_Bajo_Nivel).
- Se genera un bit interno (BIT_Falla_Nivel).
- Esta señal es utilizada en la lógica de control para detener o bloquear la bomba.

Figura 19

Calculo Protección de Nivel Parte 2



Nota. Segunda parte del cálculo de nivel de agua.

Esta protección permite prevenir la operación en condiciones de succión deficiente, evitando la formación de cavitación, la cual puede generar daños severos en el impulsor, reducción de eficiencia y fallas prematuras del equipo, lo que ayudara a reducir la frecuencia de daños en equipos y a reducir costos.

Lógica de Protección por Sobrepresión

Con el fin de garantizar la integridad del sistema de bombeo y evitar daños en la tubería,

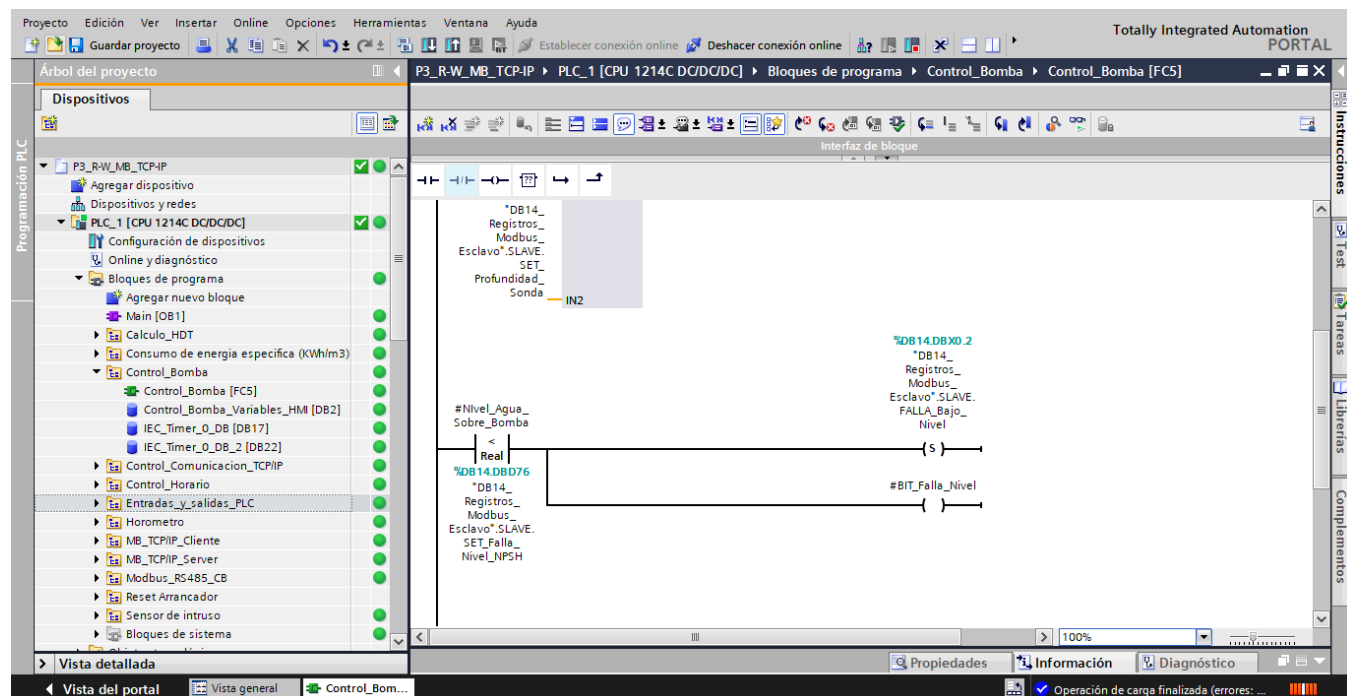
se implementó una lógica de protección por sobrepresión dentro del PLC, basada en la comparación del valor de presión medido con un umbral máximo permitido.

Inicialmente, el valor de referencia o SET de sobrepresión es previamente establecido y se introduce en el DB14 donde puede ser cambiado cuando se necesite o requiera por parte del personal encargado, este valor es convertido a tipo de dato REAL mediante una instrucción de conversión CONV, permitiendo su correcta comparación con la variable de presión escalada.

Luego de esto se emplea un temporizador tipo TON como se muestra en la Figura 20, el cual introduce un retardo de aproximadamente 2 segundos después de que la bomba enciende todo esto antes de activar la alarma, ya que el pico de arranque del equipo genera una sobrepresión. Este retardo tiene como finalidad evitar falsas activaciones debido a fluctuaciones momentáneas en la presión.

Una vez que la presión medida supera el valor límite configurado durante el tiempo establecido, se activa una marca interna de falla de sobrepresión. al arranque del bombeo.

Figura 20

Lógica de Detección de Falla por Sobrepresión

Nota. Programación de la lógica de control por falla de presión.

Esta señal de falla se almacena como un bit interno dentro del sistema, el cual será utilizado posteriormente en la lógica de control de la bomba.

Integración de Protecciones en la Lógica de Control de Arranque de Bomba

Una vez generadas las señales de falla o protección por sobrepresión o bajo nivel, estas son integradas dentro de la lógica de arranque del sistema de bombeo.

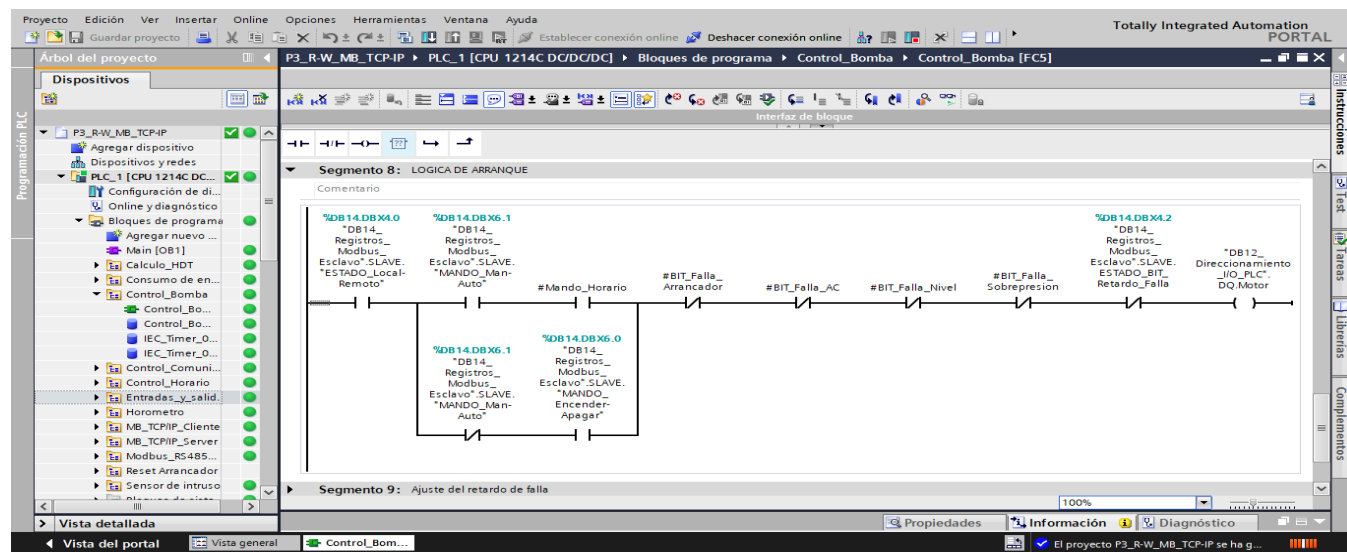
En la Figura 21 se puede observar esta lógica de arranque la cual fue diseñada para funcionar de manera automática que es cuando cumple con un control o rango de horas previamente establecidas o de manera manual que es cuando se le da mando a través de un pulsador que activa una entrada y esta a su vez después de cumplir todas las condiciones de la lógica, arranca el equipo de bombeo.

Sin embargo, uno de los aspectos más importantes es la inclusión de las protecciones, las cuales actúan como condiciones de bloqueo para el arranque de la bomba, es decir que si alguna de estas se encuentra activa el equipo no encenderá o por otro lado si el equipo se encuentra funcionando y alguna de estas protecciones se activa, el PLC apaga la salida y por tanto el equipo se apaga, luego de superada la condición de falla o protección se deben esperar un tiempo de retardo de falla para el equipo vuelva a encender.

Dentro del programa las falla o protecciones se implementan como contactos normalmente cerrados NC como se muestran en la Figura 21, lo que ayuda a que si no existe falla el sistema permite el arranque y opera con normalidad, pero si se detecta una falla el circuito se abre y la bomba se detiene o no arranca.

Figura 21

Integración de Protecciones en la Lógica de Arranque



Nota. Lógica de arranque con protecciones de nivel y presión.

Esta lógica de control no solo permite el arranque del sistema, sino que actúa como un mecanismo de protección activa, bloqueando condiciones que represente riesgo para los equipos.

Pruebas y Validación del Sistema

Para verificar el correcto funcionamiento del sistema desarrollado, se realizaron pruebas controladas sobre el sistema de monitoreo implementado en el PLC Siemens S7 1200. Estas pruebas tuvieron como objetivo validar la adquisición de datos, el procesamiento de señales y la respuesta del sistema ante condiciones críticas como bajo nivel y sobrepresión.

Las pruebas de la lógica se ejecutaron en tres etapas diferentes:

- Verificación de lectura de sensores (nivel y presión).
- Validación de escalamiento de señales analógicas.
- Evaluación de la lógica de control y protecciones.

Cada una de estas pruebas se realizaron como muestra la Tabla 3.

Tabla 3

Pruebas del Sistema

Nº	Prueba	Variable evaluada	Condición aplicada	Resultado esperado	Resultado obtenido	Estado
1	Lectura sensor de nivel	Nivel (m)	Variación manual del nivel	Lectura estable y proporcional	Lectura correcta en PLC	Cumple
2	Lectura sensor de presión	Presión (m.c.a)	Simulación de presión	Valor acorde al rango configurado	Valor correcto escalado	Cumple
3	Escalamiento señal nivel	Señal 4-20 mA	Entrada analógica variable	Conversión a metros	Escalamiento correcto	Cumple
4	Escalamiento señal presión	Señal 4-20 mA	Entrada analógica variable	Conversión a m.c.a	Conversión correcta	Cumple
5	Protección por bajo nivel	Nivel mínimo (NPSH)	Nivel por debajo del umbral	Apagado de bomba	Bomba detenida correctamente	Cumple
6	Protección por sobrepresión	Presión alta	Presión > límite	Activación de alarma	Alarma activada	Cumple
7	Lógica de arranque	Estado general	Condiciones normales	Arranque de bomba	Arranque correcto	Cumple
8	Bloqueo por fallas	Fallas activas	Presencia de falla	No arranque	Sistema bloqueado	Cumple

Nota. Pruebas realizadas para verificación del sistema.

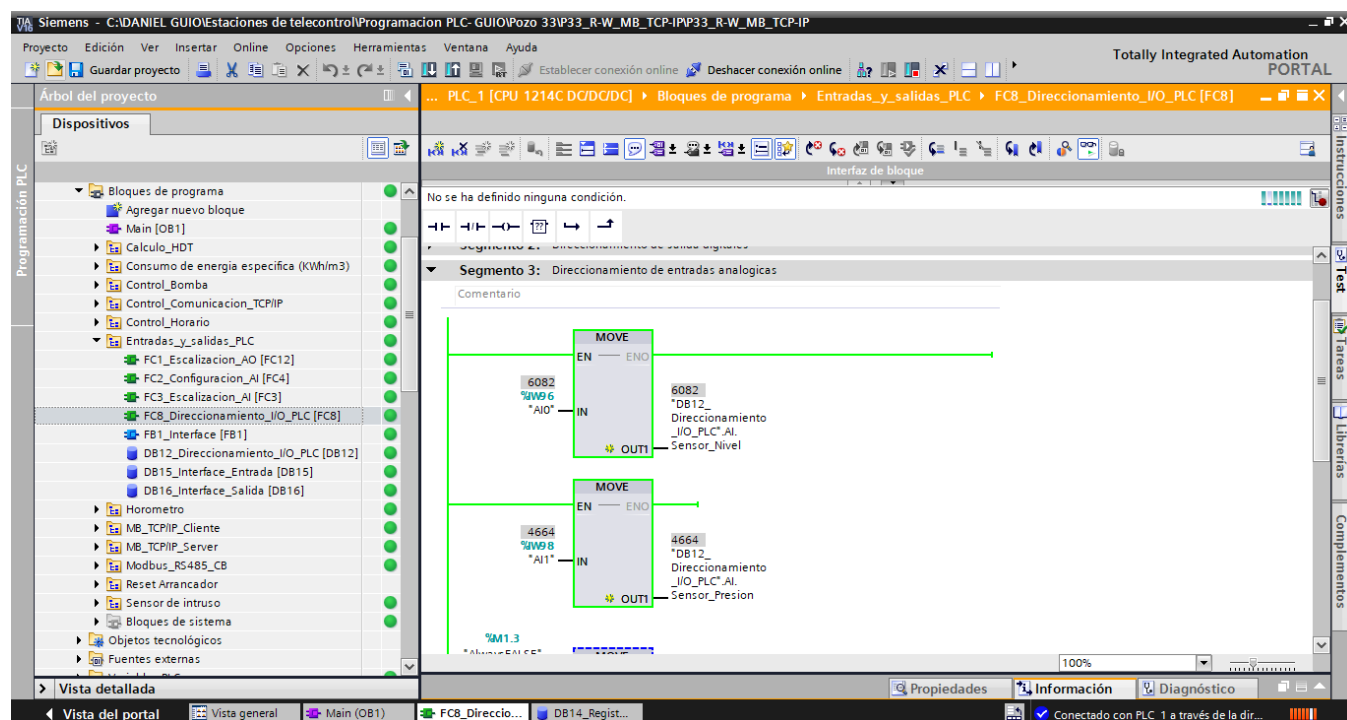
Validación de la Programación

Validación de Lectura de Sensores

Se verificó que las señales provenientes de los sensores fueran correctamente leídas por el PLC a través del módulo analógico, lo que se puede evidenciar en la Figura 22 donde se observa el PLC en línea y los sensores de nivel y presión leyendo.

Figura 22

Lectura de Entradas Analógicas en el PLC

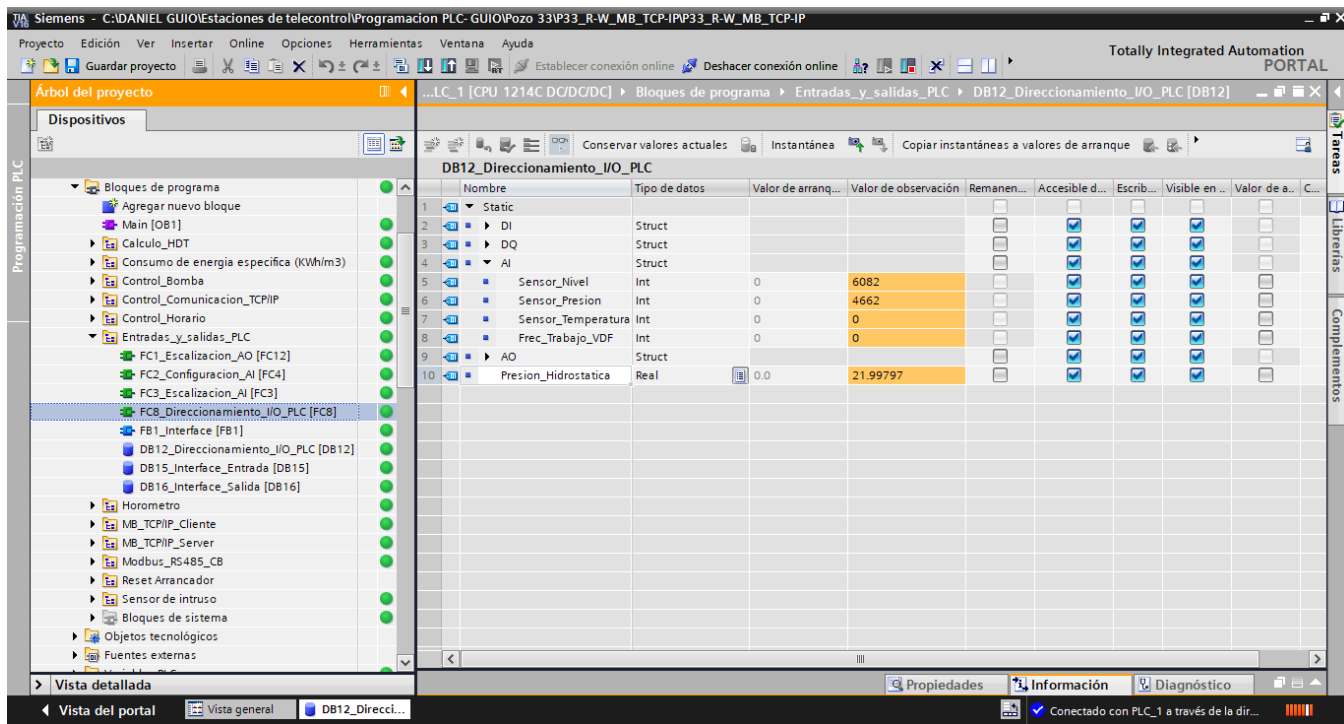


Nota. Pruebas de lectura de entradas analógicas.

Validación del Direccionamiento de Sensores

Se verificó que los sensores estuvieran bien direccionados en el DB12 como lo indica la Figura 23, en la cual se observan cada una de las variables en estudio.

Figura 23

Direccionamiento de Sensores en el PLC

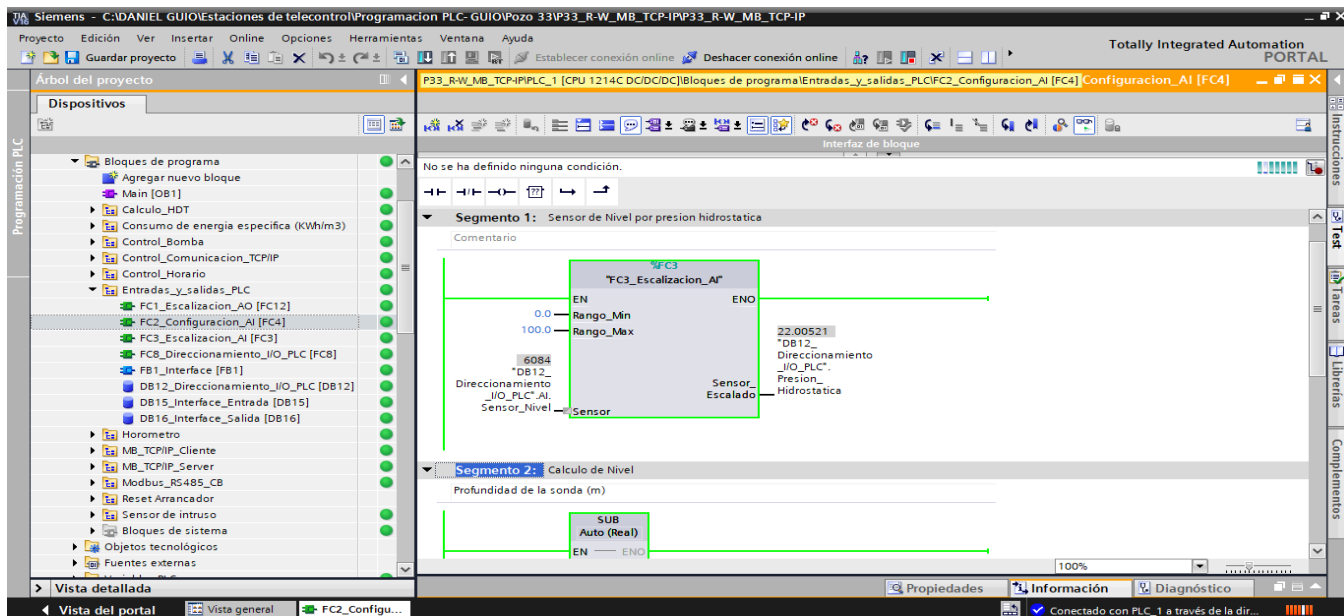
Nota. Verificación del direccionamiento de entradas en el PLC.

Validación de la Escalizacion de Sensores

Se comprobó que los valores analógicos fueran convertidos correctamente a unidades físicas, como se puede evidenciar en la Figura 24 para el sensor de nivel y la Figura 25 para el sensor de presión.

Figura 24

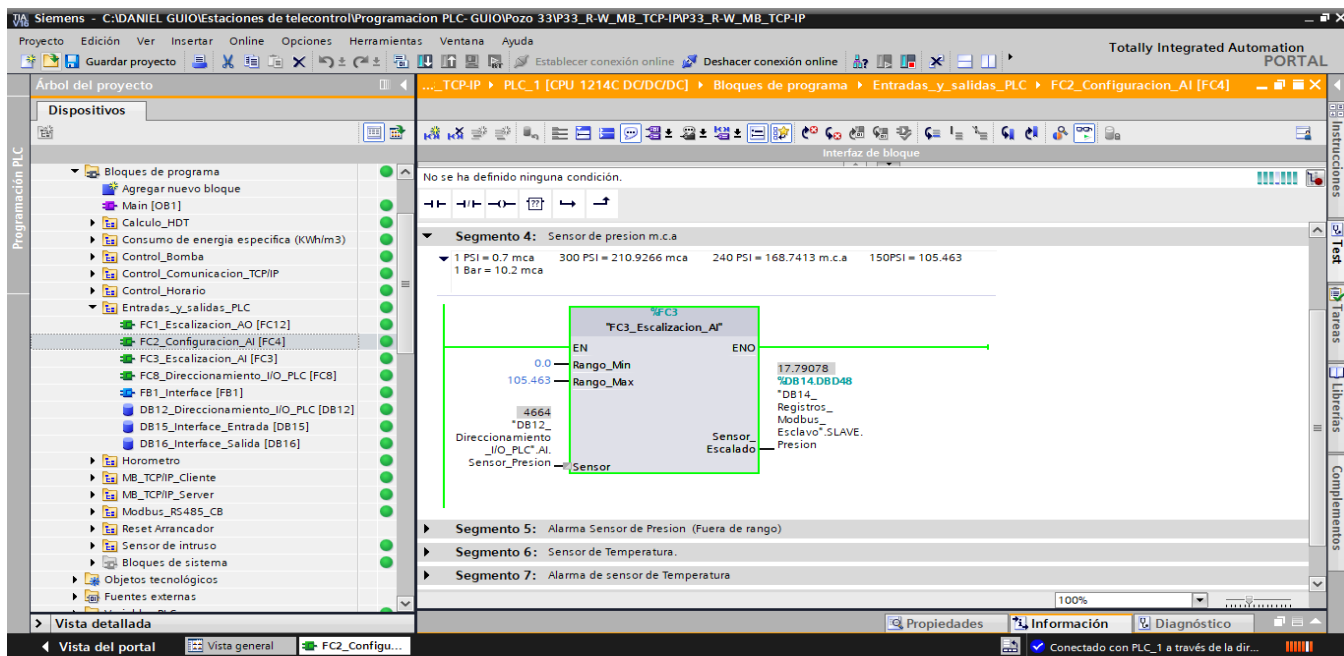
Escalizacion de Sensor de Nivel en el PLC



Nota. Verificación de lectura del sensor de nivel.

Figura 25

Escalizacion de Sensor de Presión en el PLC



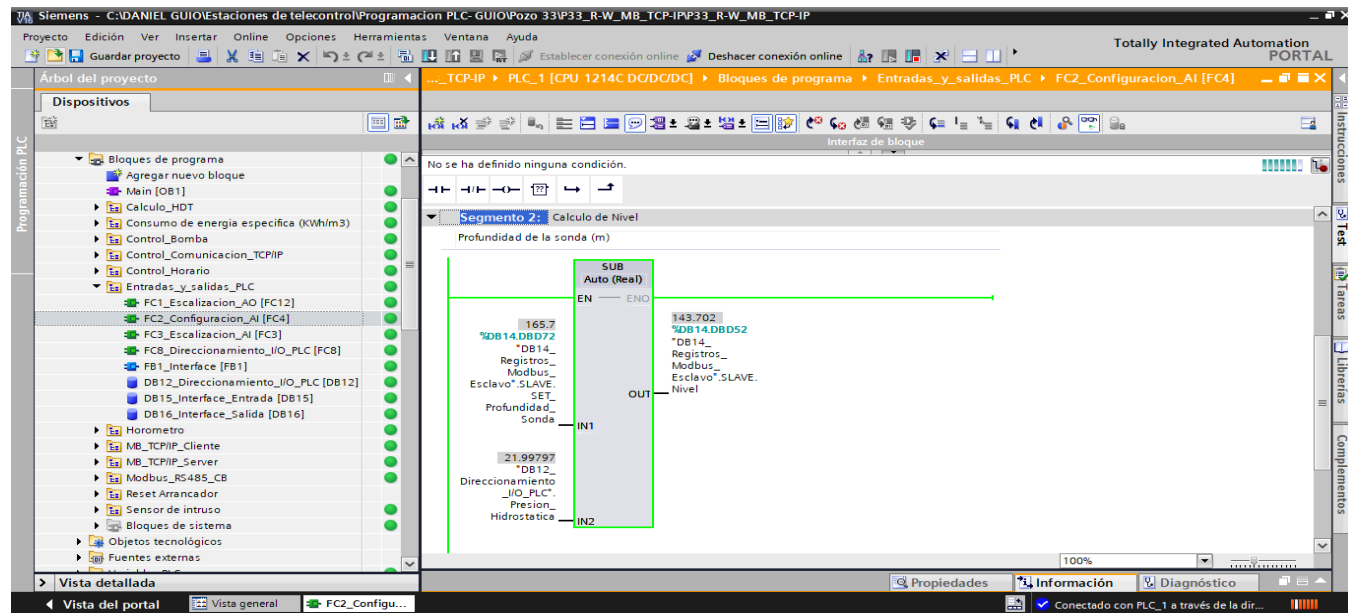
Nota. Verificación de lectura del sensor de presión.

Validación de Cálculo de Nivel y Presión

Con el PLC en modo RUN se verifica el cálculo de nivel como se puede observar en la Figura 26 y luego se realiza la verificación la lectura del sensor de presión, Figura 27.

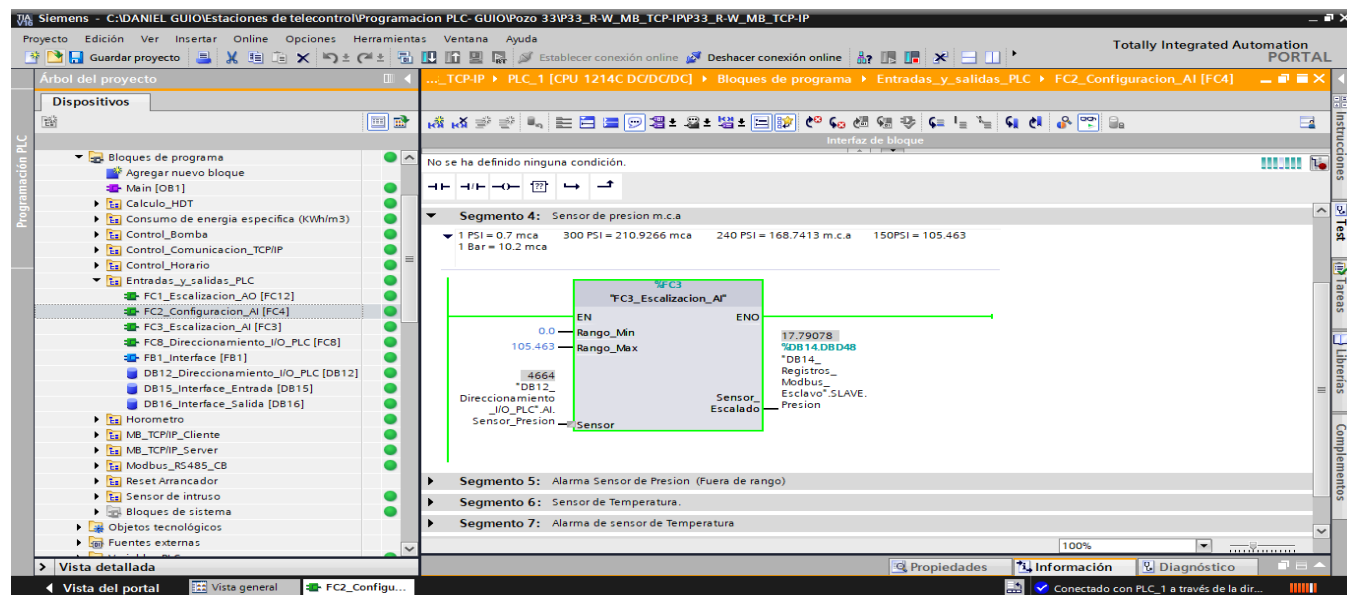
Figura 26

Validación de Cálculo de Nivel



Nota. Verificación del calculo de nivel.

Figura 27

Validación Lectura del Sensor de Presión

Nota. Verificación del cálculo de presión.

Prueba de Protección por Bajo Nivel NPSH

Para verificar el correcto funcionamiento de la protección por nivel o falla de nivel, las primeras pruebas realizadas se hicieron con condiciones normales, es decir con un nivel de agua por encima de la bomba de aproximadamente 22 metros y un SET POINT de protección o NPSH de 8 metros, lo que no permite que esta protección se active ya que el nivel de agua encima de la bomba es mayor al Set de protección, lo que permite que la bomba encienda y se mantenga trabajando siempre y cuando estas condiciones no cambien, como se evidencia en las Figuras 28, 29 y 30 respectivamente.

Figura 28

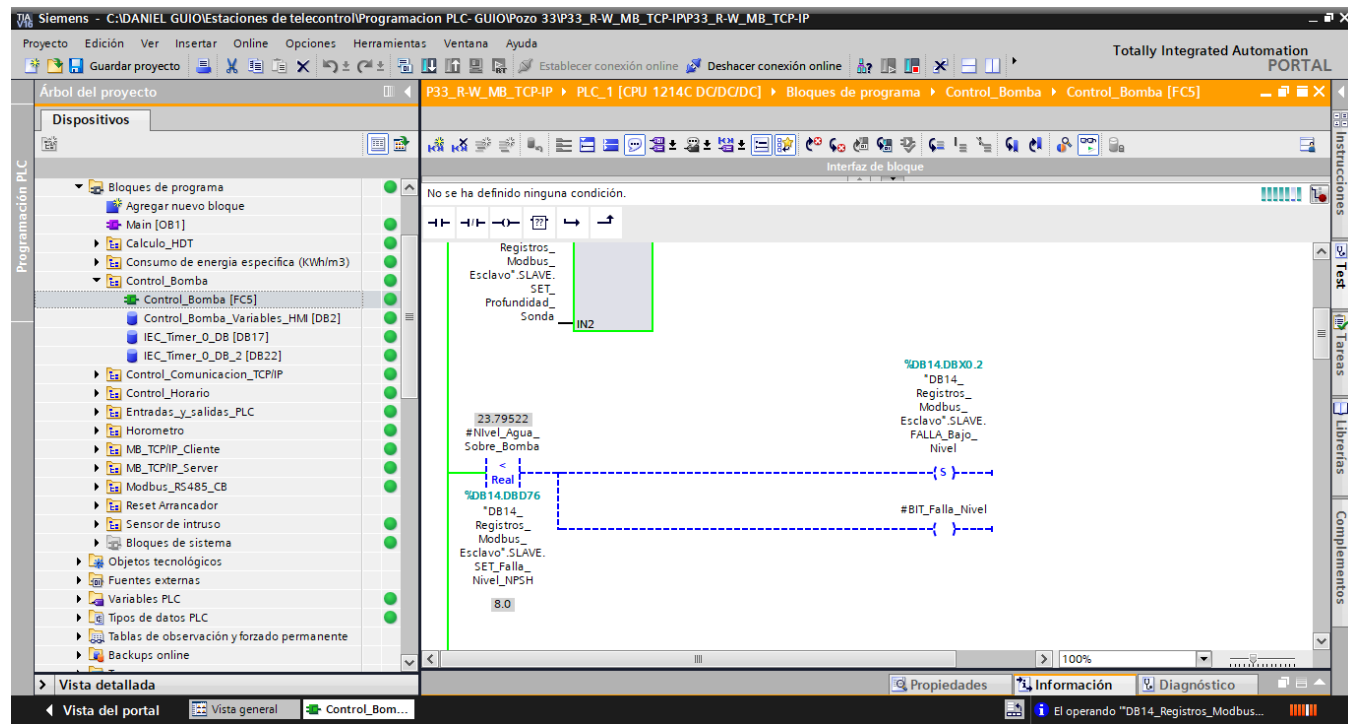
Verificación del Nivel de Agua Sobre la Bomba

The screenshot displays the Siemens SIMATIC Manager interface for a PLC program. The main workspace shows a ladder logic network with two blocks: 'SUB Auto (Real)' and 'ADD Auto (Real)'. The 'SUB Auto (Real)' block has an input 'IN1' connected to a variable '%DB14.DB068' and an output 'OUT' connected to 'Bomba-Sonda*'. The 'ADD Auto (Real)' block has an input 'IN1' connected to 'Bomba-Sonda*' and an output 'OUT' connected to 'Sobre_Bomba'. The 'ADD Auto (Real)' block also has an input 'IN2' connected to a variable '%DB14.DB072'. The status bar at the bottom indicates 'Conectado con PLC_1 a través de la dir...'. The project tree on the left shows the structure of the program, including 'Control_Bomba' and its sub-blocks.

Nota. Verificación de lectura de nivel de agua sobre la bomba.

Figura 29

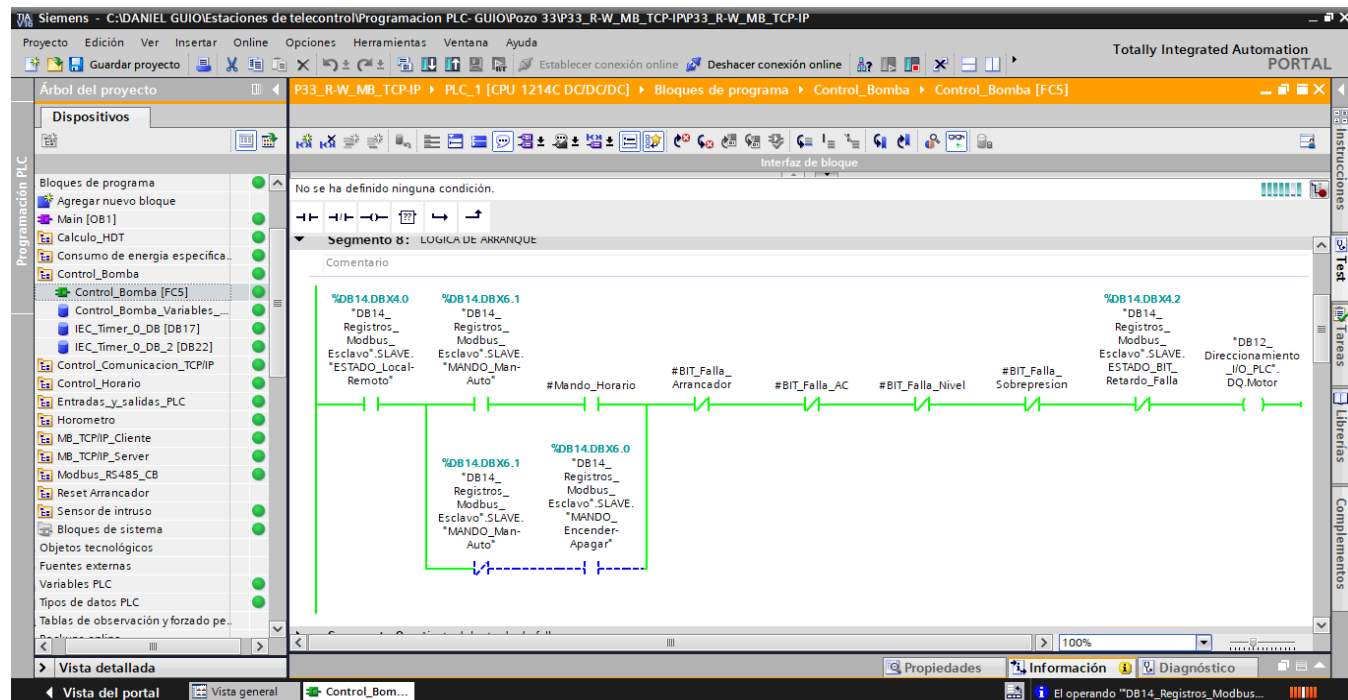
Verificación Calculo Protección por Bajo Nivel (No Activa)



Nota. Verificación de falla de nivel sin activarse.

Figura 30

Verificación de la Lógica de Control sin Fallas

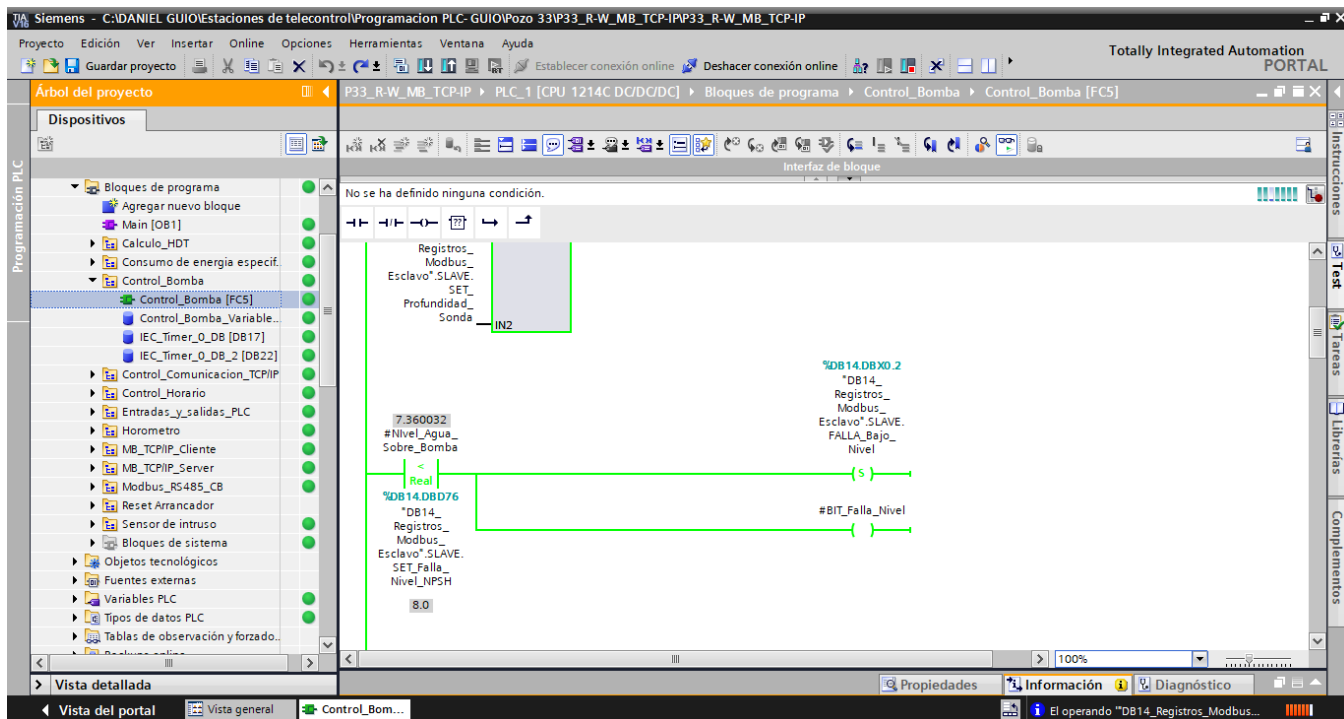


Nota. Lógica de arranque sin falla activa.

Se simuló una condición de bajo nivel en el pozo para verificar la activación de la protección, se observa que cuando el nivel calculado (en este caso es de aproximadamente 7.3 metros) es inferior al NPSH configurado (8 metros), el sistema activa la variable de falla como se observa en la Figura 31 y evita el funcionamiento de la bomba, protegiendo el equipo contra cavitación, como se puede evidenciar en la Figura 32.

Figura 31

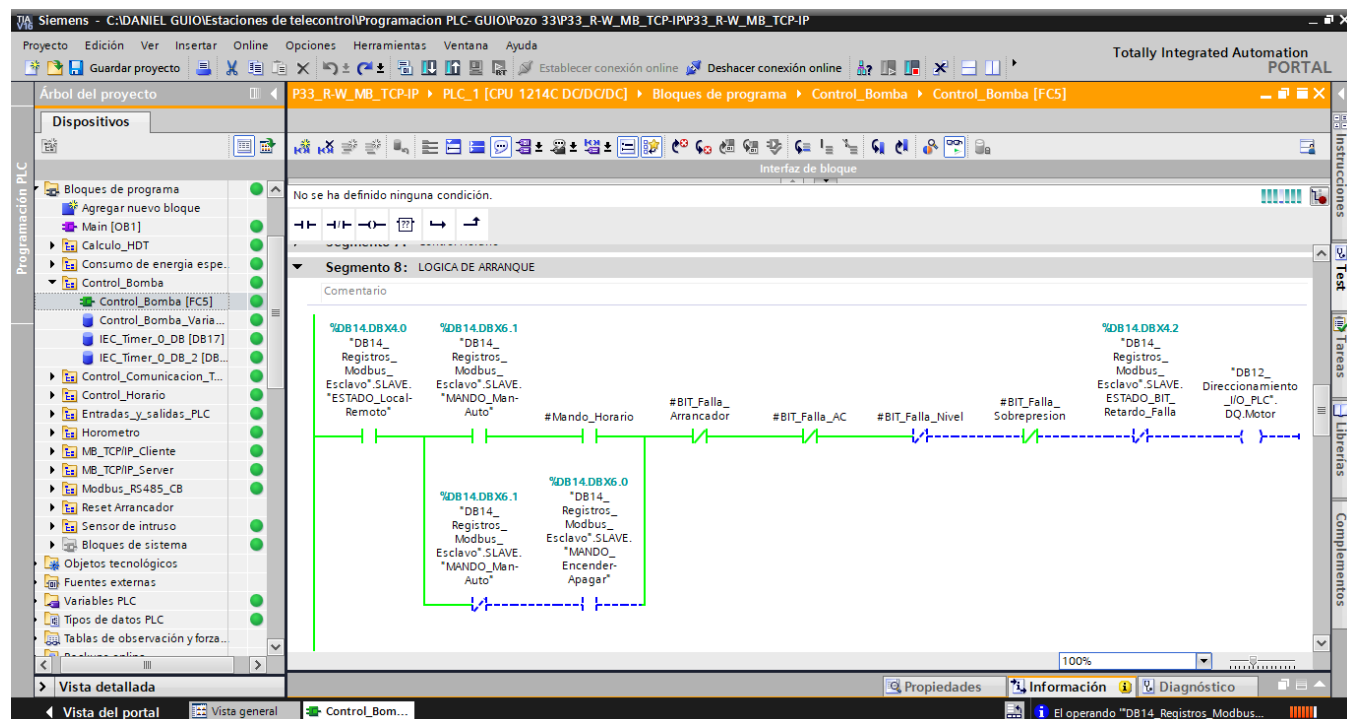
Activación de Protección por Bajo Nivel



Nota. Verificación de activación de la falla de nivel.

Figura 32

Lógica de Control Bomba Apagada por Falla_Nivel



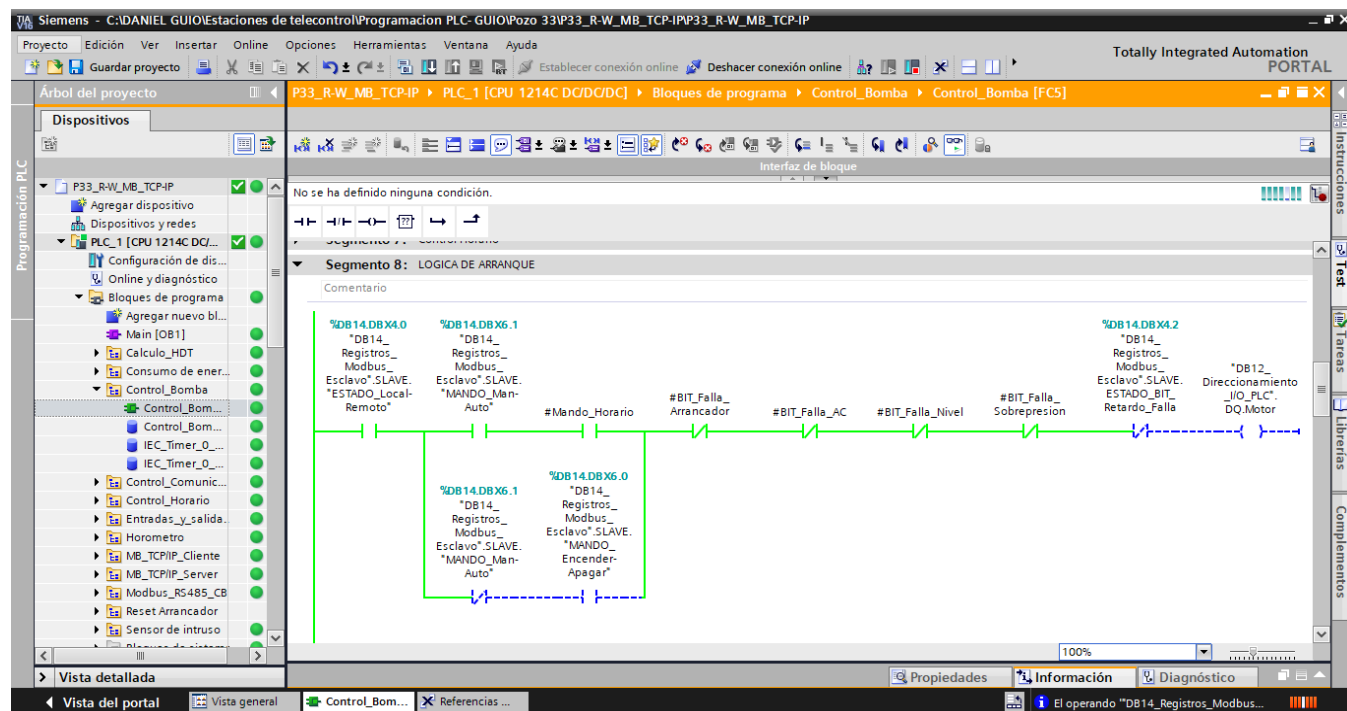
Nota. Verificación de la falla de nivel activa y la salida DQ apagada.

Prueba de Protección por Sobrepresión

En la Figura 33 se puede observar que la presión del pozo está en 17.79 m.c.a es decir que está por debajo del SET POINT de protección configurado en 100 m.c.a por lo cual la protección de sobrepresión no se activa, por lo tanto, el equipo sigue trabajando como se muestra en la Figura 30.

Figura 35

Apagado del Equipo por Protección de Sobrepresión



Nota. Bomba apagada por falla de presión.

Validación de la Lógica de Arranque

Se comprobó que la lógica de arranque solo permite el funcionamiento del equipo si no existe una condición de falla que coloque en riesgo el equipo de bombeo o la tubería del pozo, como se puede evidenciar en las Figuras 30, 32 y 35.

Los resultados obtenidos durante las pruebas demuestran que el sistema responde de manera adecuada ante las condiciones evaluadas. La adquisición de datos desde los sensores presenta estabilidad y coherencia con las variables físicas medidas.

El proceso de escalamiento permitió transformar correctamente las señales analógicas en valores reales, facilitando la toma de decisiones dentro del PLC.

En cuanto a las protecciones implementadas, tanto la lógica de bajo nivel como la de sobrepresión actuaron de manera oportuna, evitando condiciones que podrían generar daños en los equipos de bombeo, la lógica de control asegura que la bomba solo opere bajo condiciones seguras, cumpliendo con el objetivo principal del proyecto.

Conclusiones

A partir del análisis técnico realizado en el sistema de acueducto, fue posible identificar las variables críticas de operación, principalmente el nivel de agua y la presión en la tubería, las cuales influyen directamente en el funcionamiento seguro del sistema de bombeo. Esta identificación permitió establecer rangos de operación adecuados y puntos de control esenciales para prevenir fallas asociadas a cavitación y sobrepresión, contribuyendo a una operación más segura y confiable del sistema.

El diseño de la arquitectura del sistema permitió integrar de manera adecuada los sensores industriales, el módulo de entradas analógicas y el PLC Siemens S7-1200, garantizando una adquisición confiable de las señales provenientes del proceso. La selección de equipos industriales con comunicación de 4 a 20 mA proporcionó mayor estabilidad y precisión en la medición de las variables, permitiendo que el sistema pudiera adaptarse a las condiciones reales de operación presentes en el sistema de acueducto.

La implementación de la lógica de control en el PLC mediante programación en lenguaje Ladder permitió supervisar continuamente las variables de nivel y presión, además de generar protecciones automáticas ante condiciones anormales de operación. La programación desarrollada demostró un funcionamiento adecuado durante las pruebas realizadas, logrando integrar las protecciones de cavitación y sobrepresión dentro de la lógica de arranque del sistema de bombeo.

El desarrollo del presente proyecto permitió implementar un sistema automatizado de monitoreo y protección para el sistema de bombeo del acueducto de Sincelejo, integrando herramientas de automatización, instrumentación industrial y control electrónico. La solución propuesta contribuye a mejorar la supervisión de variables críticas en tiempo real, permitiendo

reducir riesgos operativos y fortalecer la seguridad del sistema. Además del aporte técnico realizado, el proyecto representó una experiencia práctica de los conocimientos adquiridos durante la formación en ingeniería electrónica.

Recomendaciones

Trabajos Futuros

Se recomienda ampliar el sistema implementado mediante la integración de una interfaz SCADA que permita realizar supervisión remota y almacenamiento histórico de variables en tiempo real. De igual manera, se plantea la posibilidad de incorporar variadores de frecuencia para optimizar el consumo energético y mejorar el control del sistema de bombeo.

Adicionalmente, el sistema podría complementarse con tecnologías IoT y módulos de comunicación industrial que permitan el monitoreo remoto desde dispositivos móviles o centros de control, facilitando la toma de decisiones y el mantenimiento preventivo del sistema.

Finalmente, se recomienda implementar nuevas variables de supervisión, como corriente, vibración y temperatura de los motores, con el propósito de desarrollar estrategias de mantenimiento predictivo que permitan aumentar la vida útil de los equipos y mejorar la confiabilidad del sistema.

Referencias Bibliográficas

- Arias, J. S., & Tarazona, J. A. (2021). *Metodología para la detección de fallas en bombas centrífugas mediante machine learning utilizando señales de vibración y presión* [Trabajo de grado, Universidad Industrial de Santander]. Repositorio Institucional UIS. <http://uis.edu.co>
- Avilés Castro, G. J., & García Rodríguez, R. (2022). *Sobreexplotación de pozos profundos y perforación irregular en acuíferos costeros*. *RECIMUNDO*, 6(1), 277–288. [https://doi.org/10.26820/recimundo/6.\(1\).ene.2022.277-288](https://doi.org/10.26820/recimundo/6.(1).ene.2022.277-288)
- Bolaños, H. (2012). *Controladores Lógicos Programables (PLC): Teoría y práctica*. Editorial Alfaomega.
- Cárdenas, J. A., Martínez, E. R., & Gómez, L. F. (2023). *IoTMonitor-WQ: Una plataforma IoT para el monitoreo remoto de la calidad del agua*. *Ciencia en Desarrollo*, 14(1), 73-84. <https://doi.org/10.19053/01217488.v14.n1.2023.13988>
- Chero Aquino, L. A. (2021). *Diseño de un sistema de bombeo automatizado para suministrar agua potable con bajo costo de operación y continuidad de servicio*. <https://repositorio.ucv.edu.pe/handle/20.500.12692/69215>
- Comisión de Regulación de Agua Potable y Saneamiento Básico. (2025). *Estudio de revisión de señales sobre pérdidas y demanda en sistemas de acueducto*. CRA. <https://www.cra.gov.co/sites/default/files/documents/2025-03/Estudio%20Pe%CC%81rdidas%20y%20Demanda%20AA-GP%20.pdf>
- Congreso de Colombia. (1994). *Ley 142 de 1994: Por la cual se establece el régimen de los servicios públicos domiciliarios y se dictan otras disposiciones*. Diario Oficial No. 41.433. <https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=2752>

Endress+Hauser. (2022). *Waterpilot FMX21: Transmisor compacto para medición de nivel por columna hidrostática* [Información técnica].

https://portal.endress.com/wa001/dla/5000557/8038/000/05/TI00431PEN_1413.pdf

Garzón Agudelo, D. M., Sarmiento Rojas, J. A., & Gutiérrez Junco, O. J. (2019). *Formulación y evaluación de proyectos de ingeniería*. Editorial UPTC.

<https://repositorio.uptc.edu.co/bitstreams/61c13129-2d3d-4751-a158-e6aaf7e12f75/download>

IEEE. (2018). *IEEE Standard for Sensor Performance Parameter Definitions* (IEEE Std 2700-2017). IEEE Xplore. [ieee.org](http://ieeexplore.ieee.org)

Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación. (2020). Código Eléctrico Colombiano (NTC 2050, 2da actualización).

International Electrotechnical Commission. (2013). *Programmable controllers – Part 3: Programming languages* (IEC 61131-3:2013). [IEC Webstore](http://www.iec.ch).

<https://webstore.iec.ch/en/publication/4552>

International Organization for Standardization. (2014). *ISO 55000: Asset management — Overview, principles and terminology*. <https://www.iso.org/standard/55088.html>

Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio. (2017). *Reglamento técnico del sector de agua potable y saneamiento básico (RAS)*. <https://www.minvivienda.gov.co/viceministerio-de-agua-y-saneamiento-basico/reglamento-tecnico-del-sector-de-agua-potable-y-saneamiento-basico-ras>

National Instruments. (2025). *4-20 mA current loop fundamentals, system design, and setup*.

<https://ni.com>

Paz Tadeo, J. E. (2024). *Diseño e Implementación de un Sistema SCADA para el monitoreo*

remoto de variables de Flujo, Presión y Nivel en estaciones de bombeo y reservorios de agua en la ciudad de Trujillo (Tesis de pregrado, Universidad Nacional de Trujillo, Trujillo-Perú).

Pérez Barreto, R. (2004). Cavitacion y materiales de construccion en las bombas centrifugas. *Minería y Geología*, 20(3-4), 114+.

<https://link.gale.com/apps/doc/A469757724/IFME?u=anon~8e18f704&sid=googleScholar&xid=80e0f4d4>

Santos Valencia, R. A., Barroso Tanoira, F. G. & Chuc Canul, F. A. (2020). *Cómo elaborar un proyecto de investigación*: (ed.). Instituto Mexicano de Contadores Públicos.

<https://elibro-net.bibliotecavirtual.unad.edu.co/es/lc/unad/titulos/130921>

Siemens AG. (2020). ¿Cómo se conecta un sensor a los módulos de señal analógica del S7-1200, S7-1500 y del ET 200MP? Siemens Industry Online Support.

<https://support.industry.siemens.com/cs/document/40913432/%C2%BFc%C3%B3mo-se-conecta-un-sensor-a-los-m%C3%B3dulos-de-se%C3%B1al-anal%C3%B3gica-del-s7-1200-s7-1500-y-del-et-200mp-?dti=0&lc=es-CO>

UNESCO. (2019). *The United Nations World Water Development Report 2019: Leaving No One Behind*. UNESCO World Water Assessment Programme.

<https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000367276>

UNESCO. (2021). *The United Nations world water development report 2021: Valuing water*.

UNESCO Publishing. <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000375724>