UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA

SEDE CONCEPCIÓN REY BALDUINO DE BÉLGICA

AUTOMATIZACIÓN SALA DE RESERVA DE AGUA DE USO SANITARIO EN HOSPITAL DR. RAFAEL AVARIA VALENZUELA, CURANILAHUE, BÍO-BÍO, CHILE.

Trabajo de titulación para optar al título profesional de Ingeniero de ejecución en control e instrumentación industrial.

Autor: Francisco Arteaga Bizama

Profesor guía: Nelson Vásquez

2026

CONSTANCIA DE VALIDACIÓN Y CONFIDENCIALIDAD DE MONOGRAFÍA A REPOSITORIO ACADÉMICO

1.- IDENTIFICACIÓN DEL TRABAJO ACADÉMICO

Tipo de monografía (marcar una opción): ☑ Memoria o trabajo de título ☐ Tesis de Postgrado

Título del trabajo: Automatización sala de reserva de agua de uso sanitario en Hospital Dr. Rafael Avaria Valenzuela, Curanilahue, Bío-Bío, Chile.

Nombre del candidato(a): Francisco Arteaga Bizama

Carrera / Grado: Ingeniería de ejecución en control e instrumentación industrial

Campus: Hualpén, Concepción **Departamento:** Electrónica e Informática

2.- VALIDACIÓN DEL PROFESOR GUÍA/DIRECTOR DE TESIS

Yo, Nelson Vásquez Concha, en mi calidad de profesor(a) guía/director(a) del trabajo académico mencionado anteriormente **DEJO CONSTANCIA** que:

- He revisado esta versión del documento y corresponde a la versión final aprobada del trabajo.
- El trabajo cumple con los requisitos académicos y de formato establecidos por la institución.

3.- EVALUACIÓN DE CONFIDENCIALIDAD POR PROPIEDAD INDUSTRIAL (marcar una opción)

☑ El trabajo **NO contiene** información que amerite confidencialidad y puede ser publicado de inmediato en repositorio con acceso abierto.

☐ El trabajo **CONTIENE** información con potenciales implicancias de propiedad industrial o intelectual y requiere un periodo de confidencialidad (**embargo**) por **(marcar una opción):**

☐ 6 meses ☐ 12 meses ☐ 2 años ☐ 3 años ☐ 5 años ☐ 10 años

Fundamentación de la necesidad de confidencialidad (obligatorio si se solicita embargo):

_____

_____

_____

4.- FIRMAS

Profesor(a) guía o director(a) de memoria o tesis:

Fecha: 12/11/26 **Firma:** _____

Estudiante o Candidato(a):

Fecha: 12/11/26 **Firma:** _____

Este formulario debe ser insertado como página 2 de la memoria o tesis, completado y firmado por estudiante y profesor(a) antes de la entrega en portal PRISMA de Biblioteca USM.

Agradecimientos

Quiero expresar mi profundo agradecimiento a Dios, el cual me encaminó en este desafío académico y me entregó las herramientas necesarias para poder culminar de una buena forma mis estudios. También agradezco a esta noble institución llamada Universidad Técnica Federico Santa María, la cual desde mis inicios como estudiante, cuando comencé con mi primera carrera técnica, me fue formando como estudiante para finalmente poder convertirme en un competente profesional, en ella también conocí a destacados docentes los cuales me orientaron y me guiaron durante todo mi proceso académico y formativo. Asimismo, agradezco a mi familia, a mi madre, a mi compañera de vida Daphne Fernández, a mi amigo Dario Bilczuk, y a aquellos compañeros de carrera quienes, en aquellos momentos de dificultad, me animaron, apoyaron y me brindaron su ayuda en mis estudios de forma desinteresada y solidaria, sin ellos habría sido más complejo terminar esta etapa. Finalmente quiero expresar mi reconocimiento a su trayectoria y dedicación pedagógica dentro de la universidad a mi profesor guía, Sr. Nelson Vásquez Concha.

"*Porque yo sé los planes que tengo para vosotros* ***—declara el Señor—****, planes de bienestar y no de calamidad, para daros un futuro y una esperanza."*

Jeremías 29:11

Resumen

El presente trabajo surge de la necesidad de mejora continua del Hospital Dr. Rafael Avaria Valenzuela, que identificó la automatización de la Sala de reservas como un proceso prioritario. Hasta entonces, el llenado de los estanques de reserva se realizaba de forma manual, con la intervención constante del operador. El objetivo del trabajo fue diseñar e implementar un sistema automatizado de llenado de los estanques de reserva que facilitara la operación del sistema de abastecimiento e impulsión de agua y aumentara la seguridad durante las labores de mantenimiento y la capacidad de respuesta ante fallas. El proyecto fue adjudicado mediante licitación a una empresa de ingeniería del Gran Concepción, de la cual el autor formó parte durante la ejecución de los trabajos. Para su desarrollo se realizaron visitas técnicas previas, en las que se evaluaron las condiciones estructurales de la instalación y la potencia eléctrica necesaria para alimentar el sistema de control. El sistema implementado integra un PLC Haiwell T16S2R-e, transmisores de presión hidrostática e interruptores de nivel tipo flotador en los estanques de reserva, válvulas de llenado con actuador eléctrico, una interfaz hombre-máquina (HMI) y dos bombas DAB ESYBOX MAX 60/120T con inversor integrado, que ajustan la velocidad de su motor en función de la presión medida por sus sensores. El control se distribuye entre ambos componentes: el PLC determina cuándo se llena cada estanque, a partir de la medición continua del nivel, y habilita o deshabilita las bombas según las condiciones de nivel y el estado de la parada, mientras que las bombas regulan la presión de forma autónoma. La comunicación industrial se implementó mediante el protocolo Modbus TCP/IP, con el PLC de la Sala de bombas y la HMI, y mediante Modbus RTU sobre RS485, con las bombas a través del accesorio Esy I/O, lo que permite supervisar su estado, presión y flujo, y enviarles la consigna de presión y el comando de reset de fallas. El trabajo alcanzó la etapa de precomisionamiento, en la que se cargó el programa en el PLC

y se realizaron pruebas en terreno que permitieron verificar la comunicación entre los equipos y la habilitación de las bombas según las condiciones programadas. Como conclusión, el sistema reemplaza la operación manual del llenado por un ciclo automático que integra en una misma lógica de control el llenado de los estanques de reserva, la habilitación de las bombas y la supervisión del sistema de bombeo, con capacidad disponible para futuras ampliaciones.

Índice

Índice ..... **v**
Introducción **1**
CAPÍTULO 1: CONTEXTUALIZACIÓN **3**
1.1 Antecedentes 3
1.2 Problemática 3
1.3 Objetivos 5
1.3.1 Objetivo general 5
1.3.2 Objetivos específicos 5
1.4 Alcance 6
CAPÍTULO 2: MARCO TEÓRICO **7**
2.1 Fundamentos de hidráulica e hidrostática 7
2.1.1 Presión hidrostática 7
2.1.2 Presión por gravedad y su rol en la automatización 8
2.2 Fundamentos hidráulicos del sistema de bombeo 8
2.2.1 Principio de Bernoulli y pérdidas de carga 9
2.2.2 Cavitación y NPSH (net positive suction head) 10
2.2.3 Curva característica del sistema y curva de la bomba 11
2.2.4 Golpe de ariete 11
2.3 Fundamentos de automatización y control 12
2.3.1 Controlador lógico programable y lenguaje Ladder 12
2.3.2 Transmisores y señal analógica de 4 a 20 mA 13
2.3.3 Variador de frecuencia y control de presión constante 13
2.3.4 Comunicación industrial Modbus 14
2.4 Marco normativo y regulatorio 15
2.4.1 Normativa eléctrica nacional 16
2.4.2 Normativa nacional de seguridad 16
CAPÍTULO 3: METODOLOGÍA Y APLICACIÓN **18**
3.1 Fases de desarrollo del proyecto 18
3.1.1 Ingeniería conceptual 18
3.1.2 Ingeniería de detalle 18
3.1.3 Construcción 19
3.1.4 Precomisionamiento 19

3.2 Filosofía de control..... 19
3.3 Estrategia de llenado..... 21
3.4 Ventajas del diseño..... 25
3.5 Instrumentación y componentes..... 27
3.5.1 Switch industrial de comunicación..... 27
3.5.2 Transmisor de presión hidrostático..... 28
3.5.3 Interruptor de nivel tipo flotador..... 29
3.5.4 Electroválvula de llenado tipo bola..... 31
3.5.5 Bombas DAB ESYBOX MAX 60/120T..... 32
3.6 Especificaciones y justificación de selección del PLC..... 34
3.6.1 Módulo de expansión analógico S04XA..... 36
3.7 Integración con bombas DAB ESYBOX MAX..... 38
3.8 Configuración de las comunicaciones..... 41
3.8.1 Topología de comunicación..... 41
3.8.2 Estructura del programa del PLC..... 42
3.8.3 Comunicación Modbus TCP/IP..... 43
3.8.4 Comunicación Modbus RTU..... 46
CAPÍTULO 4: CONCLUSIÓN Y RECOMENDACIONES..... 61
4.1 Conclusión..... 61
4.2 Recomendaciones..... 63
Linkografía..... 65
Anexos..... 67
Anexo A – Diagrama unilineal de potencia..... 67
Anexo B – Diagrama de disposición de componentes..... 67
Anexo C – Diagrama elemental de control..... 68
Anexo D – Fotos proyecto..... 70

Glosario

Caudal: Volumen de fluido que atraviesa una sección por unidad de tiempo. En este trabajo se expresa en litros por minuto (l/min).

Cavitación: Formación y colapso de burbujas de vapor en el interior de una bomba cuando la presión del líquido desciende por debajo de su presión de vapor.

Cliente/servidor: Modelo de comunicación de Modbus TCP/IP en el que el cliente inicia las solicitudes de lectura o escritura y el servidor guarda los datos y responde.

Consigna (set point): Valor deseado de una variable controlada. En las bombas corresponde a la presión que el inversor mantiene en la línea.

Contacto normalmente abierto (NA) / normalmente cerrado (NC): En un dispositivo físico, contacto que en reposo está abierto o cerrado, respectivamente. En el lenguaje Ladder, el contacto NA conduce cuando el bit vale 1 y el NC, cuando vale 0.

Contador ascendente (CTU): Instrucción del PLC que incrementa su valor actual con cada flanco de su entrada de conteo.

DN (diámetro nominal): Designación normalizada del tamaño de una cañería o válvula. DN50 equivale a 2 pulgadas.

Esy I/O: Accesorio del fabricante DAB que actúa como pasarela (Gateway) entre las bombas ESYBOX y una red Modbus RTU sobre RS485.

F3: Indicación de la pantalla de las bombas ESYBOX MAX que señala que el motor está deshabilitado por una señal externa.

Golpe de ariete: Sobrepresión transitoria que se produce en una cañería ante un cambio brusco de la velocidad del agua.

HMI (interfaz hombre-máquina): Pantalla que permite al operador visualizar variables del proceso e ingresar valores, como la consigna de presión o el reset de fallas.

Histéresis: Diferencia entre el valor al que un dispositivo se activa y el valor al que se desactiva. En los flotadores corresponde a la diferencia entre sus niveles de conexión y desconexión.

Interruptor de nivel tipo flotador: Dispositivo que conmuta un contacto eléctrico cuando el nivel del líquido alcanza la posición del flotador.

Inversor (variador de frecuencia): Equipo electrónico que regula la velocidad de un motor de corriente alterna variando la frecuencia y la tensión de alimentación.

IP (grado de protección): Código que indica la protección de una envolvente contra el ingreso de sólidos y agua, según la norma IEC 60529.

Ladder (diagrama de contactos): Lenguaje gráfico de programación de PLC basado en contactos y bobinas, definido en la norma IEC 61131-3.

Leyes de afinidad: Relaciones que describen cómo varían el caudal, la altura y la potencia de una bomba centrífuga con su velocidad de giro.

Lógica de seguridad intrínseca (fail-safe): Criterio de diseño por el cual una falla, como un corte de cable, lleva al sistema a un estado seguro.

m.c.a. (metro de columna de agua): Unidad de presión equivalente a la que ejerce una columna de agua de un metro de altura. Diez metros de columna de agua equivalen aproximadamente a 1 bar.

Maestro/esclavo: Modelo de comunicación de Modbus RTU en el que el maestro inicia las solicitudes y el esclavo responde.

Marca (M): Variable interna de un bit del PLC Haiwell, utilizada para almacenar estados lógicos.

Modbus: Protocolo de comunicación industrial abierto para el intercambio de datos entre equipos de automatización.

Modbus RTU: Variante de Modbus para comunicación serial, en este trabajo sobre RS485, con codificación binaria de los mensajes.

Modbus TCP/IP: Variante de Modbus que transporta los mensajes sobre redes Ethernet mediante el protocolo TCP/IP.

NPSH (net positive suction head): Altura neta positiva de aspiración; energía del líquido en la aspiración de una bomba, por sobre su presión de vapor.

Pasarela (gateway): Equipo que conecta dos redes o protocolos distintos y traduce la información entre ellos.

PID: Algoritmo de control proporcional, integral y derivativo, utilizado para regular una variable en torno a una consigna.

PLC (controlador lógico programable): Equipo electrónico programable que ejecuta en forma cíclica una lógica de control a partir de sus entradas y actúa sobre sus salidas.

PN (presión nominal): Presión máxima de servicio que admite un equipo o componente hidráulico.

Precomisionamiento: Etapa de un proyecto en la que se verifican la instalación, el conexionado y el funcionamiento de los equipos antes de la puesta en marcha.

Presión hidrostática: Presión que ejerce un líquido en reposo, proporcional a la altura de la columna de líquido sobre el punto de medición.

Registro (V): Variable interna de 16 bits del PLC Haiwell, utilizada para almacenar valores numéricos.

Relé de interfaz: Relé que separa el circuito de control del PLC del circuito de potencia de un actuador.

RIC: Pliegos técnicos normativos del Reglamento de seguridad de las instalaciones de consumo de energía eléctrica, dictados por la Superintendencia de Electricidad y Combustibles.

RS485: Estándar de comunicación serial diferencial que permite conectar varios equipos en un mismo bus.

Scan (ciclo de): Ciclo en que el PLC lee sus entradas, ejecuta el programa y actualiza sus salidas en forma repetitiva.

Standby: Estado de espera de las bombas: habilitadas y detenidas, listas para arrancar ante una caída de presión.

Switch industrial: Equipo de red que interconecta dispositivos Ethernet, diseñado para operar en entornos industriales.

Temporizador (TON): Instrucción del PLC que activa su salida después de que su entrada permanece activa durante un tiempo preestablecido.

Transmisor de 4 a 20 mA: Instrumento que convierte una variable física en una señal de corriente proporcional, en la que 4 mA corresponde al inicio de la escala y 20 mA, al final.

Índice de figuras

Figura 3-3-1; Habilitación de las bombas en lenguaje Ladder.....22
Figura 3-3-2; Apertura de la válvula del estanque TK2 en lenguaje Ladder.....23
Figura 3-3-3; Apertura de la válvula del estanque TK1 en lenguaje Ladder.....23
Figura 3-3-4; Escalamiento del transmisor del estanque TK2.....24
Figura 3-3-5; Escalamiento del transmisor del estanque TK1.....25
Figura 3-5-1-1; Switch industrial de comunicación PLANET ISW-500T.....28
Figura 3-5-2-1; Transmisor de presión hidrostático EYC-tech L051.....29
Figura 3-5-3-1; Ficha técnica del interruptor de nivel tipo flotador.....31
Figura 3-5-4-1; Electroválvula de llenado tipo bola.....32
Figura 3-5-5-1; Bombas DAB ESYBOX MAX 60/120T.....34
Figura 3-6-1; PLC Haiwell T16S2R-e.....36
Figura 3-6-1-1; Módulo de expansión analógico S04XA.....38
Figura 3-8-1-1; Topología de comunicación del sistema.....42
Figura 3-8-2-1; Llamada a los subprogramas desde el programa principal.....43
Figura 3-8-3-1; Generación del pulso de comunicación con el reloj de 1 s.....44
Figura 3-8-3-2; Bloque TCPMDR de lectura Modbus TCP/IP.....45
Figura 3-8-3-3; Bloque TCPMDW de escritura Modbus TCP/IP.....46
Figura 3-8-4-1; Topología de la red Modbus RTU.....47
Figura 3-8-4-2; Generador de pulsos y contador de la secuencia de comunicación..xii
Figura 3-8-4-3; Parámetros de comunicación admitidos por el Esy I/O.....48
Figura 3-8-4-4; Funciones Modbus admitidas por el Esy I/O.....49
Figura 3-8-4-5; Estados de la bomba según el manual Modbus ESYLINE.....50
Figura 3-8-4-6; Bloque MODR de lectura del estado de la bomba 1.....51
Figura 3-8-4-7; Bloque MODR de lectura de la presión de la bomba 1.....52
Figura 3-8-4-8; Bloque MODR de lectura del flujo de la bomba 1.....52
Figura 3-8-4-9; Bloque MODR de lectura del estado de la bomba 2.....53
Figura 3-8-4-10; Bloque MODR de lectura de la presión de la bomba 2.....54
Figura 3-8-4-11; Bloque MODR de lectura del flujo de la bomba 2.....54
Figura 3-8-4-12; Bloque MODR de lectura del número de bombas en falla.....55
Figura 3-8-4-13; Bloque MODW de escritura del reset de fallas.....56
Figura 3-8-4-14; Bloque MODW de escritura de la consigna de presión.....57

Figura 3-8-4-15; Reinicio de la secuencia de comunicación.....58
Figura 3-8-4-16; Carga de la consigna de presión y del reset desde la HMI.....59
Figura 3-8-4-17; Suma de los flujos de las bombas.....60

Introducción

El Hospital Provincial Dr. Rafael Avaria Valenzuela se encuentra ubicado en la comuna de Curanilahue, provincia de Arauco, Región del Biobío. El hospital cumple un rol estratégico en la atención de salud de la provincia, ya que cuenta con la infraestructura, el personal y el equipamiento necesarios para reducir los traslados de pacientes a la ciudad de Concepción. En el contexto de la mejora continua de sus instalaciones, se ha impulsado la modernización de diversos sistemas, entre ellos la automatización de procesos como la climatización y la red de agua sanitaria.

Este trabajo de titulación se enmarca en el proyecto de automatización de la Sala de reservas de agua sanitaria, que reemplazó el antiguo sistema de operación manual, basado en partidas directas mediante botoneras, por un sistema de control automático. La nueva solución incorpora un PLC (Figura 3-6-1) programado en lenguaje Ladder, una interfaz HMI para el monitoreo y la operación, transmisores de presión hidrostática (Figura 3-5-2-1) para la medición continua del nivel de los estanques, interruptores de nivel tipo flotador (Figura 3-5-3-1) como respaldo, y bombas con inversor integrado (Figura 3-5-5-1), comunicadas con el PLC mediante los protocolos Modbus TCP/IP y Modbus RTU. En este sistema, el PLC controla el llenado de los estanques de reserva según su nivel, mientras que las bombas mantienen de forma autónoma una presión constante en la línea, con el fin de mejorar la confiabilidad, la seguridad y la eficiencia energética del sistema.

El proyecto comprendió las etapas de diseño, construcción y precomisionamiento, en cumplimiento de la normativa eléctrica y de seguridad vigente, y fue ejecutado por una empresa de ingeniería del Gran Concepción, de la cual el autor formó parte como colaborador durante el desarrollo de los trabajos.

El documento se organiza en cuatro capítulos, cada uno asociado a un objetivo específico. El Capítulo 1 presenta la contextualización del proyecto: sus antecedentes, la problemática, los objetivos y el alcance. El Capítulo 2 expone el marco teórico, con los fundamentos de hidráulica, de automatización y de comunicación industrial, y el marco normativo aplicable. El Capítulo 3 describe la metodología y la aplicación: las fases del proyecto, la filosofía de control, la estrategia de llenado, la instrumentación, el PLC y la configuración de las comunicaciones Modbus. Finalmente, el Capítulo 4 presenta las conclusiones y recomendaciones del trabajo.

CAPÍTULO 1: CONTEXTUALIZACIÓN

1.1 Antecedentes

En el marco de las iniciativas de mejora continua y modernización de sus instalaciones, la dirección del hospital ha impulsado la actualización de diversos sistemas críticos, entre los que se incluyen la climatización y, de manera relevante, el sistema de abastecimiento y distribución de agua sanitaria. Este último constituye un servicio de soporte vital, ya que su correcto funcionamiento es indispensable para la operación de las unidades de hospitalización, los pabellones quirúrgicos, la esterilización y otros servicios clínicos.

Antes del desarrollo del presente proyecto de automatización, el llenado de los estanques de reserva operaba bajo un esquema de control manual. Un operador, de forma presencial y mediante comandos eléctricos desde una botonera, accionaba directamente los equipos para gestionar el llenado. Las limitaciones de esta forma de operación se analizan en la sección siguiente.

1.2 Problemática

Antes del desarrollo del presente proyecto, el sistema de llenado de los estanques de reserva del Hospital Dr. Rafael Avaria Valenzuela presentaba limitaciones que afectaban su eficiencia, su confiabilidad y su seguridad operacional, y que podían comprometer la continuidad de un servicio esencial para el funcionamiento del establecimiento.

La operación se basaba en un esquema de control manual, dependiente de la intervención presencial de un operador, que gestionaba el llenado de los estanques mediante una botonera. Esto implicaba tiempos de respuesta lentos y una alta carga operacional. Además, los arranques y paradas de las bombas no respondían a la demanda real del sistema, sino a la disponibilidad del

operador para accionar los equipos, por lo que los ciclos de bombeo podían prolongarse más de lo necesario.

Esta forma de operación, junto con el arranque directo de las bombas a plena carga y sus paradas bruscas, favorecía el desgaste de los componentes electromecánicos, como las bombas y los contactores, y exponía a la red de cañerías a transitorios de presión. A ello se sumaba el consumo energético asociado a ciclos de bombeo más largos de lo necesario.

La falta de instrumentación y de una interfaz de supervisión obligaba al operador a realizar inspecciones periódicas en la sala e impedía conocer en forma continua variables como el nivel de los estanques o la presión en la línea. En consecuencia, el sistema no tenía capacidad de detectar a tiempo condiciones anómalas, como un nivel críticamente bajo de agua, la falla de una bomba o una sobrepresión, ni contaba con alarmas o protecciones automáticas ante ellas.

Adicionalmente, las características de la Sala de reservas y la necesidad de supervisión presencial exponían al personal a riesgos laborales evitables, en una instalación que podía operar de forma autónoma.

La problemática descrita evidencia la necesidad de migrar hacia un sistema automatizado que permita controlar el llenado de los estanques según su nivel, reducir el desgaste de los equipos y el consumo energético, y mejorar la continuidad del suministro de agua sanitaria. Esto, mediante la integración de un controlador lógico programable (PLC), instrumentación de campo, bombas con inversor integrado (Figura 3-5-5-1) y una interfaz hombre-máquina (HMI) que permita la supervisión centralizada del sistema y la generación de alarmas.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo general

- Diseñar e implementar un sistema de control automático basado en un PLC para la Sala de reservas de agua sanitaria del Hospital Dr. Rafael Avaria Valenzuela, que permita un llenado eficiente y seguro de los estanques de reserva, mediante la integración de instrumentación de campo, comunicaciones industriales, una interfaz HMI y el desarrollo de la lógica de control.

1.3.2 Objetivos específicos

- Analizar el sistema existente de llenado de los estanques de reserva, identificando sus limitaciones operacionales y de control, para fundamentar técnicamente los requerimientos de automatización.
- Establecer los fundamentos teóricos de hidráulica, hidrostática, sistemas de bombeo, automatización y comunicación industrial, junto con el marco normativo aplicable al diseño y la ejecución del sistema de control.
- Diseñar, programar e implementar el sistema automatizado, definiendo su arquitectura de control y su lógica de operación, especificando la instrumentación y el controlador, y configurando las comunicaciones industriales Modbus TCP/IP y Modbus RTU, junto con las variables de intercambio con la interfaz HMI.
- Evaluar el funcionamiento del sistema mediante pruebas funcionales de señales durante el precomisionamiento, y proponer recomendaciones para su evolución en etapas futuras.

1.4 Alcance

El presente trabajo de titulación tiene como alcance el diseño, la implementación y el precomisionamiento de un sistema de control automático para la Sala de reservas de agua sanitaria del Hospital Dr. Rafael Avaria Valenzuela, ubicado en la comuna de Curanilahue, provincia de Arauco, Región del Biobío. El desarrollo del proyecto comprende la ingeniería de detalle del sistema de control, la selección y especificación técnica de los componentes de instrumentación, la elaboración de diagramas eléctricos y de control, la programación de la lógica de control en lenguaje Ladder para el controlador lógico programable (PLC) Haiwell T16S2R-e (Figura 3-6-1), la configuración de las comunicaciones industriales Modbus TCP/IP y Modbus RTU, la definición de las variables de intercambio con la interfaz hombre-máquina (HMI) y la integración de las bombas DAB ESYBOX MAX 60/120T (Figura 3-5-5-1) con inversor integrado. Asimismo, contempla la construcción del tablero de fuerza y control, el cableado y conexionado de los instrumentos de campo, y la verificación del sistema mediante pruebas de precomisionamiento de la lógica de control, de las comunicaciones Modbus y de la instrumentación. El trabajo no incluye el diseño de las pantallas de la HMI, el rediseño hidráulico de la red de cañerías existente ni la puesta en marcha integral con el hospital en operación, actividades que quedan fuera del alcance definido para esta etapa.

CAPÍTULO 2: MARCO TEÓRICO

El presente capítulo establece los fundamentos teóricos y normativos que sustentan el diseño y la implementación del sistema de control automático de la Sala de reservas. Su desarrollo se organiza en tres ejes. El primero corresponde a los fundamentos físicos del proceso: los principios de la hidrostática y de la mecánica de fluidos que gobiernan el comportamiento del agua en los estanques y en la red de cañerías, incluidos fenómenos perjudiciales como la cavitación y el golpe de ariete. El segundo corresponde a los fundamentos de la solución de control: el controlador lógico programable, la medición mediante transmisores de 4 a 20 mA, el control de velocidad de las bombas mediante inversor y la comunicación industrial Modbus. El tercero corresponde al marco normativo eléctrico y de seguridad laboral que rige la ejecución de la instalación.

2.1 Fundamentos de hidráulica e hidrostática

Los principios de la hidráulica y de la hidrostática permiten comprender el comportamiento del fluido del proceso, en este caso agua potable, y constituyen la base para seleccionar la instrumentación de medición y los equipos de bombeo adecuados.

2.1.1 Presión hidrostática

La presión que ejerce una columna de fluido en reposo es directamente proporcional a la densidad del fluido, a la aceleración de gravedad y a la altura de la columna. Esta relación se expresa como:

$$P = \rho \cdot g \cdot h$$

donde:

- P: presión hidrostática, en pascales (Pa).
- ρ: densidad del fluido, en kg/m³ (aproximadamente 1000 kg/m³ para el agua).

- g: aceleración de gravedad (9,81 m/s²).
- h: altura de la columna de líquido sobre el punto de medición, en metros (m).

Este es el principio de medición de los transmisores de presión hidrostática (Figura 3-5-2-1) utilizados en el proyecto. Instalados en el fondo de cada estanque de reserva, miden la presión que ejerce la columna de agua sobre su diafragma y entregan una señal de corriente de 4 a 20 mA proporcional a ella. Como la densidad del agua y la aceleración de gravedad son prácticamente constantes, la presión medida es proporcional a la altura de la columna, lo que permite obtener el nivel del estanque en forma continua. Como referencia práctica, una columna de 10 m de agua ejerce una presión aproximada de 1 bar.

2.1.2 Presión por gravedad y su rol en la automatización

Cuando el suministro de agua se realiza por gravedad desde estanques, la presión disponible en la red depende de la altura del nivel de agua sobre los puntos de consumo. Por ello, a medida que el consumo hace descender el nivel, la presión disponible disminuye en la misma proporción, y mantener el nivel de los estanques dentro de un rango adecuado es una condición para asegurar la continuidad y la presión del suministro.

Este principio fundamenta la estrategia de control del proyecto: la medición continua del nivel mediante los transmisores permite iniciar la reposición del agua en forma automática, sin la demora propia de la operación manual, mientras que los interruptores de nivel tipo flotador (Figura 3-5-3-1) entregan límites discretos e independientes de esa medición.

2.2 Fundamentos hidráulicos del sistema de bombeo

El proyecto se desarrolló sobre una red de cañerías existente, cuyo diseño hidráulico no formó parte del alcance de este trabajo. Sin embargo, la operación automática del sistema y la selección de las bombas dependen de los principios de la mecánica de fluidos que rigen el flujo

en la red, los que se presentan a continuación como base teórica para comprender el proceso controlado.

2.2.1 Principio de Bernoulli y pérdidas de carga

El teorema de Bernoulli es la aplicación del principio de conservación de la energía a un fluido en movimiento: establece que, en un flujo estacionario de un fluido incompresible y sin pérdidas, la energía total por unidad de peso se mantiene constante a lo largo de una línea de corriente. Para el análisis de sistemas con bombas se utiliza la ecuación general de la energía, que incorpora la energía que la bomba entrega al fluido y las pérdidas por fricción en las cañerías y accesorios:

$$P_1/(\rho \cdot g) + v_1^2/(2 \cdot g) + z_1 + h_B = P_2/(\rho \cdot g) + v_2^2/(2 \cdot g) + z_2 + h_L$$

donde:

- $P/(\rho \cdot g)$: carga de presión, en metros de columna de agua (m.c.a.).
- $v^2/(2 \cdot g)$: carga de velocidad, en metros.
- z: elevación del punto respecto de un nivel de referencia, en metros.
- h_B: carga total que la bomba entrega al fluido, en metros.
- h_L: pérdidas de carga por fricción y accesorios entre ambos puntos, en metros, que suelen calcularse mediante la ecuación de Darcy-Weisbach.

En el proyecto, esta ecuación explica la presión que deben entregar las bombas para llevar el agua hasta los estanques de reserva: la suma de la diferencia de altura entre la bomba y el punto de descarga, de las pérdidas de carga en la red y de la presión requerida a la salida. El inversor de las bombas mantiene la presión de impulsión en el valor de ajuste configurado, de modo que esa demanda se cubre con la velocidad de giro estrictamente necesaria.

2.2.2 Cavitación y NPSH (net positive suction head)

La cavitación es un fenómeno que debe evitarse en cualquier sistema de bombeo. Ocurre cuando la presión en la aspiración de la bomba cae por debajo de la presión de vapor del líquido, lo que forma burbujas de vapor que colapsan violentamente al llegar a zonas de mayor presión dentro de la bomba. Sus consecuencias son la erosión de los impulsores, vibraciones, ruido, pérdida de rendimiento y, en casos severos, la falla del equipo.

Para evaluar el riesgo de cavitación se comparan dos magnitudes. La altura neta positiva de aspiración requerida (NPSHr) es una característica de la bomba: representa la energía mínima que necesita el líquido en la aspiración para evitar la cavitación, la entrega el fabricante en sus curvas y aumenta con el caudal. La altura neta positiva de aspiración disponible (NPSHa) es una característica de la instalación y representa la energía que efectivamente tiene el líquido al ingresar a la bomba. Se calcula como:

$$\text{NPSHa} = h_{atm} \pm h_{geo} - h_f - h_v$$

donde:

- h_{atm}: presión atmosférica, expresada en metros de columna de agua.
- h_{geo}: diferencia de altura entre la superficie del líquido y el eje de la bomba, positiva si el estanque está sobre la bomba y negativa si está bajo ella.
- h_f: pérdidas de carga en la línea de aspiración, en metros.
- h_v: presión de vapor del líquido a la temperatura de operación, en metros de columna de agua.

Para operar sin cavitación, la NPSHa debe ser mayor que la NPSHr con un margen de seguridad, habitualmente de al menos 0,5 m. En el proyecto, este criterio se complementa con la

protección contra el funcionamiento en seco que incorporan las bombas ESYBOX MAX (Figura 3-5-5-1), que detienen el motor ante la falta de agua en la aspiración.

2.2.3 Curva característica del sistema y curva de la bomba

La curva del sistema representa la altura manométrica que la red requiere para cada caudal: está formada por la altura estática, que no depende del caudal, más las pérdidas de carga, que crecen aproximadamente con el cuadrado del caudal. La curva de la bomba, entregada por el fabricante, indica la altura que la bomba puede entregar para cada caudal a una velocidad de giro determinada. El punto de operación es la intersección de ambas curvas, donde la altura que entrega la bomba iguala a la que requiere el sistema.

En una bomba de velocidad variable, como las utilizadas en este proyecto, la curva de la bomba se desplaza con la velocidad de giro de acuerdo con las leyes de afinidad: el caudal varía en forma proporcional a la velocidad, la altura con su cuadrado y la potencia absorbida con su cubo. Por ello, el inversor puede ajustar la velocidad para mantener la presión de impulsión en el valor de ajuste frente a distintos caudales, y una reducción moderada de la velocidad produce una reducción importante de la potencia consumida, lo que explica el ahorro energético de este tipo de equipos frente a las bombas de velocidad fija.

2.2.4 Golpe de ariete

El golpe de ariete es un fenómeno transitorio de presión que se produce cuando la velocidad del agua en una cañería cambia bruscamente, por ejemplo, al cerrar rápidamente una válvula o al detener una bomba de manera abrupta. El cambio de velocidad genera una onda de presión que recorre la cañería y que puede superar ampliamente la presión de operación (González, 2023). Su magnitud máxima puede estimarse mediante la ecuación de Joukowsky:

$$\Delta P = \rho \cdot a \cdot \Delta v$$

donde:

- ΔP: sobrepresión producida por el golpe de ariete, en pascales (Pa).
- ρ: densidad del agua, en kg/m³.
- a: celeridad o velocidad de propagación de la onda de presión en la cañería, en m/s.
- Δv: variación de la velocidad del agua, en m/s.

Si la sobrepresión resultante supera la presión que admiten las cañerías y los equipos, existe riesgo de rotura de la red o de daño en las bombas y válvulas. En el proyecto, este fenómeno se mitiga mediante el arranque y la parada graduales que permite el inversor de las bombas, y mediante el accionamiento eléctrico de las válvulas de bola (Figura 3-5-4-1), cuyo actuador realiza las maniobras de apertura y cierre en forma progresiva y no instantánea.

2.3 Fundamentos de automatización y control

Esta sección presenta los conceptos de automatización en los que se basa la solución implementada: el controlador lógico programable, la medición mediante señales analógicas de corriente, el control de velocidad de las bombas y la comunicación industrial entre los equipos.

2.3.1 Controlador lógico programable y lenguaje Ladder

El controlador lógico programable (PLC) es un equipo electrónico diseñado para el control de procesos industriales. Su funcionamiento es cíclico: en cada ciclo de scan lee el estado de sus entradas, ejecuta el programa de usuario y actualiza sus salidas, por lo que su tiempo de respuesta depende de la duración de ese ciclo. La norma IEC 61131-3 define los lenguajes de programación de los PLC, entre ellos el diagrama de contactos o Ladder, un lenguaje gráfico basado en contactos y bobinas que representa la lógica de control de forma similar a un circuito eléctrico de relés.

En un programa Ladder, un contacto normalmente abierto conduce cuando el bit asociado vale 1, y un contacto normalmente cerrado, cuando vale 0, con independencia de cómo esté cableado el dispositivo físico. Esta distinción es importante en los sistemas que aplican una lógica de seguridad intrínseca (*fail-safe*), en los que los sensores se cablean en configuración normalmente cerrada para que una falla, como el corte de un cable, se interprete como la condición segura.

2.3.2 Transmisores y señal analógica de 4 a 20 mA

Un transmisor convierte una variable física, como la presión o el nivel, en una señal eléctrica normalizada que puede transmitirse a distancia hacia el sistema de control. La señal de corriente de 4 a 20 mA es el estándar más utilizado en la industria: el valor de 4 mA corresponde al inicio de la escala y el de 20 mA, al final. Al ser una señal de corriente, es poco sensible a la resistencia de los conductores y al ruido eléctrico, y el uso de 4 mA como cero vivo permite distinguir una medición en el inicio de la escala de una falla del lazo, como un cable cortado, que entregaría 0 mA.

En la configuración a dos hilos, el mismo par de conductores alimenta al transmisor y transporta la señal de medición. En el PLC, un módulo de entradas analógicas convierte la corriente en un valor digital, que el programa escala luego a unidades de ingeniería mediante una relación lineal.

2.3.3 Variador de frecuencia y control de presión constante

Un variador de frecuencia, o inversor, regula la velocidad de un motor de corriente alterna modificando la frecuencia y la tensión de su alimentación. En los sistemas de bombeo de presión constante, el inversor recibe la medición de un sensor de presión en la impulsión y ajusta

la velocidad de la bomba mediante un lazo de control, para mantener esa presión en un valor de ajuste cualquiera sea el caudal demandado.

Frente al arranque directo, este método reduce los picos de corriente en el arranque, evita las paradas bruscas que favorecen el golpe de ariete y, de acuerdo con las leyes de afinidad, disminuye el consumo de energía cuando la demanda es menor que la nominal. En el proyecto, este lazo de control lo ejecutan las propias bombas, por lo que el PLC no requiere implementar un algoritmo de control PID.

2.3.4 Comunicación industrial Modbus

Modbus es un protocolo de comunicación industrial abierto, ampliamente utilizado para el intercambio de datos entre controladores, instrumentos, variadores y otros equipos de automatización (Modbus Organization, 2012). Funciona bajo un esquema de solicitud y respuesta: un equipo envía una solicitud con un código de función, que indica la operación que debe realizarse, como leer o escribir datos, y una dirección inicial; el equipo consultado responde con los datos solicitados o con un mensaje de excepción si la solicitud no es válida.

Los datos de cada equipo se organizan en cuatro tablas: las salidas discretas (*coils*), de un bit y de lectura y escritura; las entradas discretas, de un bit y solo de lectura; los registros de entrada, de 16 bits y solo de lectura; y los registros de retención (*holding registers*), de 16 bits y de lectura y escritura. Una correcta definición de este mapa de datos es fundamental, porque una dirección errónea puede generar lecturas incorrectas, alarmas falsas o la pérdida de información relevante. Las principales variantes del protocolo son las siguientes.

Modbus RTU

Transmite los mensajes en formato binario a través de una línea serial, habitualmente RS485, a velocidades típicas de 9600 a 115200 baudios, y verifica la integridad de cada mensaje

mediante un código CRC. Funciona bajo un esquema maestro-esclavo, en el que un único maestro inicia todas las comunicaciones y cada esclavo, identificado por una dirección de 1 a 247, solo responde a las solicitudes que se le dirigen. Es una solución robusta, económica y de amplia compatibilidad, adecuada para conectar instrumentos y equipos de campo, aunque su velocidad y su escalabilidad son menores que las de las redes Ethernet.

Modbus ASCII

Transmite los mismos mensajes codificados como caracteres ASCII y verifica su integridad mediante un código LRC. Cada mensaje ocupa aproximadamente el doble de caracteres que en RTU, por lo que su eficiencia es menor, pero tolera intervalos más largos entre caracteres, lo que lo hace útil en enlaces lentos o con módems. En la actualidad es una variante poco utilizada.

Modbus TCP/IP

Transporta los mensajes Modbus sobre redes Ethernet mediante el protocolo TCP/IP, utilizando por defecto el puerto 502 y un encabezado MBAP (*Modbus Application Protocol header*) que identifica cada transacción. En esta variante, la terminología maestro-esclavo se reemplaza por la de cliente y servidor: el cliente inicia las solicitudes y el servidor responde. Permite mayores velocidades, la conexión simultánea de múltiples equipos y una integración directa con sistemas HMI y SCADA.

2.4 Marco normativo y regulatorio

La ejecución de la instalación se rigió por la normativa eléctrica y de seguridad laboral vigente en Chile, que se resume a continuación.

2.4.1 Normativa eléctrica nacional

Las instalaciones de consumo de energía eléctrica en Chile se rigen por el Decreto Supremo N.° 8, de 2019, del Ministerio de Energía, que aprueba el Reglamento de seguridad de las instalaciones de consumo de energía eléctrica, y por sus pliegos técnicos normativos RIC, dictados por la Superintendencia de Electricidad y Combustibles (Ministerio de Energía, 2019; Superintendencia de Electricidad y Combustibles, 2020). Los pliegos aplicables al proyecto son los siguientes:

- RIC N.° 2: establece los requisitos de seguridad que deben cumplir los tableros eléctricos.
- RIC N.° 3: establece los requisitos de seguridad que deben cumplir los alimentadores y subalimentadores.
- RIC N.° 4: establece los requisitos de seguridad que deben cumplir los conductores, los materiales y los sistemas de canalización.
- RIC N.° 5: establece las medidas de protección contra tensiones peligrosas y descargas eléctricas.
- RIC N.° 7: establece los requisitos de seguridad que deben cumplirse al instalar equipos eléctricos.
- RIC N.° 10: establece los requisitos de seguridad y operación de las instalaciones de consumo de uso general.

2.4.2 Normativa nacional de seguridad

En materia de seguridad y salud en el trabajo, la ejecución del proyecto consideró la siguiente normativa:

- Ley N.° 16.744: establece el seguro social obligatorio contra accidentes del trabajo y enfermedades profesionales (Ministerio del Trabajo y Previsión Social, 2019).
- Decreto Supremo N.° 44, de 2024, del Ministerio del Trabajo y Previsión Social: aprueba el nuevo reglamento sobre gestión preventiva de los riesgos laborales para un entorno de trabajo seguro y saludable, vigente desde el 1 de febrero de 2025 (Ministerio del Trabajo y Previsión Social, 2024).
- Decreto Supremo N.° 594, de 1999, del Ministerio de Salud: aprueba el reglamento sobre condiciones sanitarias y ambientales básicas en los lugares de trabajo (Ministerio de Salud, 2020).

CAPÍTULO 3: METODOLOGÍA Y APLICACIÓN

En este capítulo se desarrollan el diseño y la implementación del sistema de control automático de la Sala de reservas del Hospital Dr. Rafael Avaria Valenzuela. En primer lugar, se describen las fases de desarrollo del proyecto y la filosofía de control que guio las decisiones técnicas: una arquitectura de control distribuido, en la que el PLC (Figura 3-6-1) gestiona el llenado de los estanques de reserva, la habilitación de las bombas (Figura 3-5-5-1) y la supervisión del sistema, mientras que las bombas regulan la presión de forma autónoma. A continuación, se presentan la estrategia de llenado y su programación en lenguaje Ladder, la instrumentación y los componentes seleccionados, el PLC y su módulo de expansión (Figura 3-6-1-1), la integración de las bombas DAB ESYBOX MAX y, finalmente, la configuración de las comunicaciones Modbus TCP/IP y Modbus RTU entre los equipos.

3.1 Fases de desarrollo del proyecto

El proyecto se desarrolló siguiendo las fases habituales de un proyecto de ingeniería, adquisición y construcción (EPC), en el que una misma empresa asume el diseño, la adquisición de los equipos y la ejecución de las obras. Estas fases se describen a continuación.

3.1.1 Ingeniería conceptual

En esta fase inicial se realizó el levantamiento y análisis del sistema existente, identificando las problemáticas y definiendo los requerimientos técnicos del nuevo sistema de control. Se establecieron los objetivos, el alcance preliminar y los criterios de aceptación, sentando las bases técnicas para las etapas siguientes.

3.1.2 Ingeniería de detalle

Comprendió el desarrollo técnico del sistema, incluidos el diseño de la arquitectura de control, la elaboración de los diagramas eléctricos y de control, la programación del PLC (Figura

3-6-1), la definición de las variables de intercambio con la interfaz HMI y la especificación técnica de la instrumentación requerida.

3.1.3 Construcción

Consistió en la ejecución física del proyecto, abarcando las actividades de montaje, instalación de componentes, cableado, conexionado e integración hardware-software. Esta fase se rigió por la normativa eléctrica nacional y de seguridad laboral.

3.1.4 Precomisionamiento

Etapa final del trabajo, en la que se cargó el programa en el PLC (Figura 3-6-1) y se realizaron pruebas en terreno para verificar el conexionado de la instrumentación, la comunicación entre los equipos y el funcionamiento de la lógica de control conforme a los requerimientos definidos.

3.2 Filosofía de control

El sistema de bombeo de los estanques de reserva del Hospital Dr. Rafael Avaria Valenzuela experimentó una importante mejora, al pasar de una operación manual, que requería la intervención constante del operador, a un sistema automatizado. En este sistema, el llenado de los estanques se controla según su nivel, y las bombas (Figura 3-5-5-1) entregan el caudal de llenado según la demanda de presión. La mejora se sustenta en una filosofía de control combinada: la lógica de la secuencia y los límites de seguridad son administrados por un controlador lógico programable (PLC), mientras que el control de la presión y el suministro del caudal para el llenado de los estanques de reserva se delegan a bombas con inversor integrado, específicamente del modelo DAB ESYBOX MAX 60/120T. La filosofía operacional se estructura en tres pilares. En primer lugar, el llenado de los estanques de reserva se controla según su nivel: el PLC (Figura 3-6-1) abre o cierra la válvula de llenado (Figura 3-5-4-1) de cada

estanque según la medición continua del transmisor de nivel (Figura 3-5-2-1), y la apertura de una válvula produce la caída de presión que pone en marcha las bombas. En segundo lugar, se establece un esquema de seguridad por redundancia, con varias capas de protección que combinan la medición analógica de los transmisores con señales discretas de respaldo, como los interruptores de nivel (Figura 3-5-3-1) y la parada. Al accionarse, la parada cierra las válvulas de ambos estanques, deshabilita las bombas y se informa como falla general al PLC de la Sala de bombas. En tercer lugar, se prioriza la eficiencia energética y operacional, aprovechando la capacidad de las bombas de modular la velocidad de su motor para mantener una presión constante en la línea. Esto permite arranques y paradas graduales, que reducen los picos de corriente, los transitorios de presión y el desgaste mecánico de los componentes. Con estos tres pilares, el sistema responde a las limitaciones del sistema manual original, como la lentitud de respuesta y la falta de monitoreo, e incorpora flexibilidad operativa, capacidad de telemetría y una mejor respuesta ante fallas.

El sistema adopta una arquitectura de control distribuido, en la que las responsabilidades se dividen entre sus componentes principales. El PLC, modelo Haiwell T16S2R-e, actúa como unidad de supervisión y coordinación del sistema. Sus funciones principales son las siguientes:

- Gestionar la lógica de llenado de los estanques de reserva, mediante la apertura y el cierre de sus válvulas.
- Habilitar o deshabilitar las bombas según el nivel bajo de los estanques de reserva, las señales de nivel de los estanques principales recibidas desde el PLC de la Sala de bombas y el estado de la parada.
- Procesar las señales discretas y analógicas de la instrumentación de campo.

- Mantener comunicación bidireccional con el PLC de la Sala de bombas, mediante Modbus TCP/IP, y con las bombas, mediante Modbus RTU a través del accesorio Esy I/O. Por esta última vía, el PLC supervisa el estado, la presión y el flujo de cada bomba y les transmite la consigna de presión y el comando de reset de fallas.

Por su parte, las bombas ESYBOX MAX poseen un control propio que regula la presión ajustando de manera dinámica la velocidad del motor mediante el inversor integrado, con el fin de mantener constante la presión en la línea frente a las variaciones de la demanda. Esta distribución de funciones conlleva ventajas operativas significativas. Permite un desacoplamiento funcional, ya que el PLC no requiere ejecutar un lazo de control PID para regular la presión; esa tarea la realizan las propias bombas con su control integrado, y el PLC solo les entrega la consigna.

3.3 Estrategia de llenado

La estrategia de llenado se compone de dos partes, a las que se suma la comunicación entre los equipos del sistema de control. La primera corresponde a la habilitación de las bombas (Figura 3-5-5-1): una vez habilitadas, estas permanecen en espera (*standby*) y arrancan de forma automática cuando detectan una caída de presión en la línea. Esta habilitación se programa en el subprograma Bombas. La marca M100 (“arrancar bombas”) se activa cuando se cumplen simultáneamente tres condiciones: nivel bajo en los dos estanques de reserva (entradas X1 y X3), nivel bajo en al menos uno de los estanques principales de la Sala de bombas (marcas M42 o M43, recibidas desde el PLC de esa sala) y parada no accionada (X0). La salida Y4 se conecta a la entrada de deshabilitación de las bombas, configurada como activa con señal alta (parámetro Ix = 5), y se programa con un contacto normalmente cerrado de M100, por lo que sus estados son siempre opuestos. Mientras M100 está activa, Y4 permanece desactivada y las bombas quedan

habilitadas. Si deja de cumplirse cualquiera de las condiciones, M100 se desactiva, Y4 se activa y las bombas se deshabilitan, con la indicación F3 en su pantalla. En particular, al accionarse la parada, las bombas se deshabilitan. Como los interruptores de nivel bajo (Figura 3-5-3-1) son flotadores con contrapeso, presentan una diferencia entre su nivel de conexión y su nivel de desconexión: una vez habilitadas, las bombas permanecen así durante el llenado hasta que el agua alcanza el punto superior de conmutación de los flotadores.

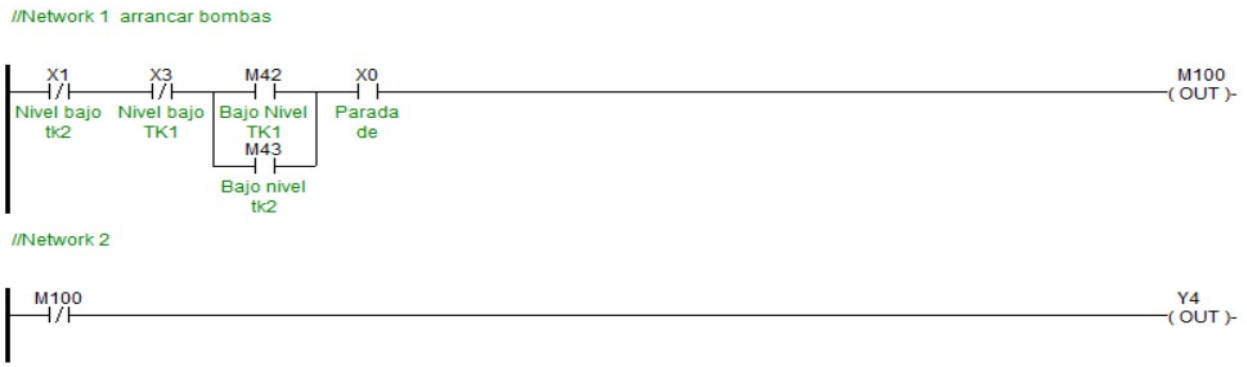


Figura 3-3-1; Habilitación de las bombas en lenguaje Ladder.

La segunda parte corresponde a la apertura de las válvulas de llenado (Figura 3-5-4-1) de los estanques de reserva, que determina el PLC (Figura 3-6-1): al abrirse una válvula, la presión en la línea cae y, si las bombas están habilitadas, comienzan a impulsar agua hacia el estanque, de modo que el llenado se realiza de forma automática. La apertura de cada válvula depende de condiciones en serie, replicadas para ambos estanques en los subprogramas Tanque 1 y Tanque 2. La condición principal proviene del transmisor de nivel (Figura 3-5-2-1) de cada estanque: el valor escalado (V10 para el estanque TK1 y V20 para el TK2) se compara con un umbral fijo, y cuando es igual o menor que 18 se activa la marca M10 o M20, respectivamente. A esta condición se suman otras dos: que el interruptor de nivel alto del estanque no esté actuado (X4 para TK1 y X2 para TK2) y que la parada no esté accionada (X0). Estas entradas discretas se

cablean en configuración normalmente cerrada, por lo que en condición normal se encuentran activas y se programan con contactos normalmente abiertos. Si el agua alcanza el interruptor de nivel alto, si se acciona la parada o si se corta un cable, la entrada se desactiva y la válvula se cierra. Cuando se cumplen las tres condiciones, se activa la salida Y1, que abre la válvula 1 del estanque TK1, o la salida Y0, que abre la válvula 2 del estanque TK2.



Figura 3-3-2; Apertura de la válvula del estanque TK2 en lenguaje Ladder.



Figura 3-3-3; Apertura de la válvula del estanque TK1 en lenguaje Ladder.

El escalamiento de la señal de los transmisores se realiza con la instrucción SC, con el mismo criterio para ambos estanques. Según las especificaciones del módulo analógico S04XA (Figura 3-6-1-1), las entradas convierten la señal de 4 a 20 mA con una resolución de 12 bits y la expresan en un código digital de 0 a 32000. Por ello, los límites de entrada del bloque se fijaron en InDown = 0 e InUp = 32000, que corresponden a 4 y 20 mA, respectivamente. El transmisor tiene un rango de medición de 0 a 6 m de columna de agua (aproximadamente 0,6 bar), y los límites de salida del bloque se fijaron en OutDown = 0 y OutUp = 60, de modo que el valor escalado representa el nivel en decímetros. Como el resultado del bloque se almacena como un

número entero, esta escala permite expresar el nivel con una resolución de 10 cm; si se hubiera escalado directamente en metros (0 a 6), el nivel solo podría expresarse en metros enteros. Con esta escala, el umbral de 18 equivale aproximadamente a 1,8 m. Mientras el valor escalado sea igual o menor que 18, se activa la marca M10 (estanque TK1) o M20 (estanque TK2), que habilita la apertura de la válvula; así, este valor establece el nivel máximo de llenado en operación normal y deja un margen de seguridad bajo el borde del estanque.



Figura 3-3-4; Escalamiento del transmisor del estanque TK2.



Figura 3-3-5; Escalamiento del transmisor del estanque TK1.

3.4 Ventajas del diseño

La lógica de control implementada organiza las condiciones de llenado en dos niveles. El primero es común a todo el sistema: la parada (X0) interviene tanto en la activación de ambas válvulas como en la habilitación de las bombas (Figura 3-5-5-1), de modo que su accionamiento cierra las dos válvulas y deshabilita las bombas. El segundo es específico de cada estanque: la válvula de llenado (Figura 3-5-4-1) se abre solo cuando el transmisor (Figura 3-5-2-1) indica que el nivel está bajo el umbral de llenado y el interruptor de nivel alto (Figura 3-5-3-1) no está actuado. Como todas estas condiciones se conectan en serie, basta que una de ellas no se cumpla para que la válvula se cierre, lo que da prioridad a la seguridad por sobre la operación de llenado. A esto se suman otros dos elementos. Primero, el cableado de los interruptores de nivel alto y de la parada en configuración normalmente cerrada hace que un corte de cable se interprete como condición de falla y cierre las válvulas, en lugar de pasar inadvertido. Segundo, cada estanque cuenta con dos medios de medición independientes: el transmisor, que gobierna el llenado en operación normal, y el interruptor de nivel alto, que impide el rebalse si la medición analógica

falla. En cuanto a las bombas, su habilitación depende de los interruptores de nivel bajo de los estanques de reserva, de las señales de nivel de los estanques principales recibidas desde el PLC de la Sala de bombas y del estado de la parada; además, la diferencia entre los niveles de conexión y desconexión de los flotadores de nivel bajo evita que la habilitación cambie con pequeñas variaciones del nivel durante el llenado. Otra ventaja es la distribución del control entre el PLC (Figura 3-6-1) y las bombas. El PLC determina cuándo se llena cada estanque mediante la apertura de su válvula, y las bombas, habilitadas y en espera, arrancan de forma automática ante la caída de presión que produce esa apertura y regulan la presión mediante su inversor, ajustando la velocidad a la demanda. Al PLC le corresponden, además, la habilitación de las bombas y la supervisión del sistema. Esta división simplifica el programa, que no requiere un lazo PID, y concentra en el PLC la información del sistema de bombeo. Mediante Modbus RTU, el PLC lee en forma secuencial el estado, la presión y el flujo de cada bomba y el número de bombas en falla, y permite modificar la consigna de presión y solicitar el reset de fallas desde la HMI, sin necesidad de acceder a los equipos. A su vez, la comunicación Modbus TCP/IP con el PLC de la Sala de bombas coordina ambas salas: el PLC de la Sala de reservas recibe las señales de nivel de los estanques principales y envía la señal de falla general y un pulso de comunicación que el PLC de la Sala de bombas puede utilizar para supervisar el enlace. Finalmente, el programa está organizado en subprogramas independientes por función, y el hardware dispone de entradas, salidas, puertos de comunicación y puertos del switch (Figura 3-5-1-1) libres, lo que facilita futuras modificaciones y ampliaciones. En conjunto, el sistema implementado reemplaza la operación manual del llenado por un ciclo automático en el que el llenado de los estanques de reserva, la habilitación de las bombas y la supervisión del sistema de bombeo quedan integrados en una misma lógica de control.

3.5 Instrumentación y componentes

3.5.1 Switch industrial de comunicación

La red Ethernet del sistema se construye en torno a un switch industrial PLANET ISW-500T, que actúa como punto común de conexión de los nodos Modbus TCP/IP descritos anteriormente. Se trata de un switch compacto no administrable, que no requiere configuración. Sus cinco puertos RJ45 10/100BASE-TX negocian automáticamente la velocidad y el modo dúplex, y detectan el tipo de cable (auto-MDI/MDI-X), por lo que admiten indistintamente cables directos o cruzados. Conmuta las tramas mediante almacenamiento y reenvío (*store-and-forward*), con una capacidad de conmutación de 1 Gbps, suficiente para que sus cinco puertos operen simultáneamente a plena velocidad y muy superior al tráfico Modbus del sistema, y dispone de control de flujo IEEE 802.3x y de priorización de tráfico IEEE 802.1p. Admite cables UTP de categoría 3 a 6, con una longitud máxima de 100 m por segmento. En cuanto a su construcción, tiene una carcasa metálica con grado de protección IP30, se monta en riel DIN y soporta descargas electrostáticas (ESD) y transitorios rápidos (EFT) de hasta 6 kV; además, cumple con ensayos de caída libre, impacto y vibración según la norma IEC 60068-2. Se alimenta mediante un bloque de terminales de seis polos con dos entradas redundantes de 12 a 48 VDC (o una de 24 VAC), con protección contra inversión de polaridad, y consume como máximo 2 W a plena carga. El mismo bloque incluye un contacto de alarma por falla de alimentación (24 VDC, 1 A), que permanece cerrado en operación normal y se abre ante una falla. Para el diagnóstico, el panel frontal dispone de indicadores LED de presencia de alimentación en cada entrada, de alarma y de enlace y actividad en cada puerto, que permiten verificar en terreno el estado de la conexión de cada equipo.



Figura 3-5-1-1; Switch industrial de comunicación PLANET ISW-500T.

3.5.2 Transmisor de presión hidrostático

Para medir de forma continua el nivel de cada estanque de reserva se utiliza un transmisor de presión sumergible EYC-tech L051, que se instala en el fondo del estanque y mide la presión hidrostática de la columna de agua, proporcional a su altura. Su elemento sensor es un diafragma piezorresistivo, y tanto su carcasa como las partes en contacto con el líquido son de acero inoxidable AISI 316, con grado de protección IP68. Esto lo hace resistente a la corrosión y apto para operar sumergido en forma permanente; el fabricante lo indica, entre otras aplicaciones, para equipos de agua potable. El transmisor utilizado tiene un rango de medición de 0 a 6 m de columna de agua (aproximadamente 0,6 bar), y entrega una señal de 4 a 20 mA a dos hilos, de modo que el mismo par de conductores lleva la alimentación (10 a 30 VDC) y la señal de medición, lo que simplifica el cableado. Esta señal es compatible con las entradas analógicas del módulo S04XA (Figura 3-6-1-1), configuradas para 4 a 20 mA, y varía linealmente con el nivel. En el programa, el bloque SC convierte el código digital de 0 a 32000 en un valor de 0 a 60, que representa el nivel del estanque en decímetros (0 a 6 m). Con esta escala, el umbral de 18 (aproximadamente 1,8 m) establece el nivel máximo de llenado en operación normal y deja un

margen de seguridad bajo el borde del estanque, mientras que el interruptor de nivel alto (Figura 3-5-3-1), ubicado levemente por sobre ese nivel, actúa solo si el agua lo supera. Según el fabricante, la exactitud lineal del transmisor es de ±0,5 % de la escala completa y el error de cero por temperatura es de ±0,2 % de la escala completa por cada 10 °C de variación de temperatura, valores suficientes para el control de llenado por umbral que realiza el sistema. Además, incorpora protección contra inversión de polaridad, sobretensión y cortocircuito, y tiene un tiempo de respuesta de 5 ms o menos. En cuanto a la compatibilidad eléctrica, la resistencia de carga máxima admitida depende de la tensión de alimentación y del largo del cable; con una alimentación de 24 VDC es de algo menos de 700 Ω, muy superior a la impedancia de entrada de 250 Ω del módulo analógico (EYC-tech, 2023).

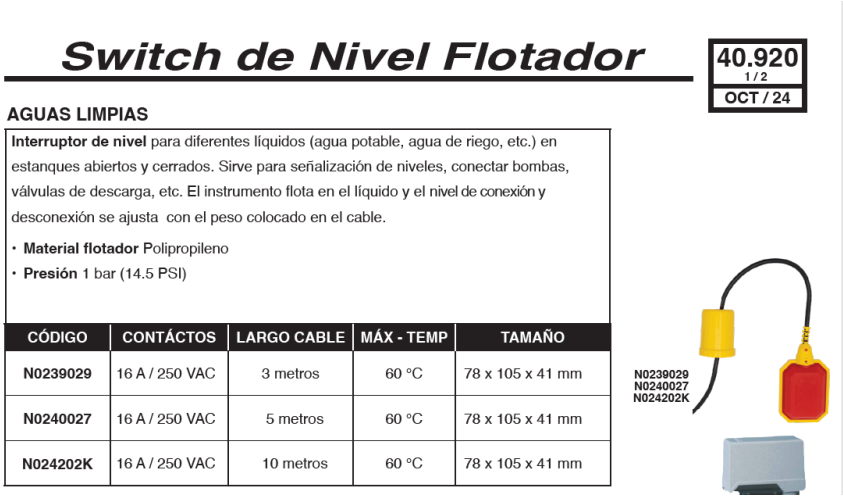


Figura 3-5-2-1; Transmisor de presión hidrostático EYC-tech L051.

3.5.3 Interruptor de nivel tipo flotador

Para detectar los niveles alto y bajo de los estanques de reserva se utilizan interruptores de nivel de tipo flotador para aguas limpias, aptos para líquidos como el agua potable, en estanques abiertos o cerrados. Cada interruptor dispone de un contacto conmutado (común,

normalmente abierto y normalmente cerrado) con una capacidad de 16 A a 250 VAC, muy superior a la corriente que demandan las entradas digitales del PLC (Figura 3-6-1). El contacto común se alimenta desde una fuente de 24 VDC, tensión compatible con las entradas digitales del PLC, de modo que el interruptor entrega directamente una señal discreta, sin necesidad de acondicionamiento adicional. Los interruptores se cablean en configuración normalmente cerrada, de modo que la apertura del circuito, ya sea por actuación del flotador o por corte de cable, produce el mismo efecto en la lógica que la actuación del interruptor. El flotador es de polipropileno, un material resistente al agua y químicamente inerte; admite una presión máxima de 1 bar, adecuada para estanques atmosféricos, y una temperatura máxima de 60 °C, holgada para el agua del sistema. Los niveles de conexión y desconexión se ajustan mediante la posición del contrapeso colocado en el cable, sin requerir otros elementos de montaje, y los modelos utilizados, con cables de 3 m (N0239029) y 5 m (N0240027), permiten adaptarlos a la profundidad de cada estanque. Al tratarse de un mecanismo sin electrónica, su funcionamiento es independiente de la medición analógica de los transmisores (Figura 3-5-2-1). Los interruptores de nivel alto (X2 y X4) forman parte, junto con la condición del transmisor, de las condiciones en serie que habilitan las válvulas de llenado (Figura 3-5-4-1); en operación normal, el transmisor determina la apertura y el cierre, y el interruptor actúa como límite de último recurso que impide el rebalse si la medición analógica falla. Por su parte, los interruptores de nivel bajo (X1 y X3) intervienen en la habilitación de las bombas (Figura 3-5-5-1), que requiere, entre otras condiciones, que ambos indiquen nivel bajo, y en la señal de falla general (M41) que se envía al PLC de la Sala de bombas. Gracias a la diferencia entre sus niveles de conexión y desconexión, las bombas permanecen habilitadas durante el llenado hasta que el agua alcanza el punto superior de conmutación de estos flotadores.



Switch de Nivel Flotador

40.920
1 / 2
OCT / 24

AGUAS LIMPIAS

Interruptor de nivel para diferentes líquidos (agua potable, agua de riego, etc.) en estanques abiertos y cerrados. Sirve para señalización de niveles, conectar bombas, válvulas de descarga, etc. El instrumento flota en el líquido y el nivel de conexión y desconexión se ajusta con el peso colocado en el cable.

- **Material flotador** Polipropileno
- **Presión** 1 bar (14.5 PSI)

CÓDIGO	CONTÁCTOS	LARGO CABLE	MÁX - TEMP	TAMAÑO
N0239029	16 A / 250 VAC	3 metros	60 °C	78 x 105 x 41 mm
N0240027	16 A / 250 VAC	5 metros	60 °C	78 x 105 x 41 mm
N024202K	16 A / 250 VAC	10 metros	60 °C	78 x 105 x 41 mm

N0239029
N0240027
N024202K

Figura 3-5-3-1; Ficha técnica del interruptor de nivel tipo flotador.

3.5.4 Electroválvula de llenado tipo bola

El llenado de cada estanque de reserva se controla mediante una válvula de bola con actuador eléctrico: la salida Y1 del PLC (Figura 3-6-1) comanda la válvula del estanque TK1 y la salida Y0, la del estanque TK2. Las válvulas de bola proporcionan un cierre estanco y, por su paso total, generan una baja pérdida de carga cuando están abiertas, lo que las hace adecuadas para un servicio de apertura y cierre (todo o nada) como el del llenado de los estanques. Cada salida digital del PLC energiza la bobina de 24 VDC de un relé de interfaz. Al energizarse la bobina, el contacto normalmente abierto del relé (terminales 11, común, y 14, normalmente abierto) se cierra y conecta la alimentación de 24 VAC hacia el actuador de la válvula, que abre el paso del agua hacia el estanque. De este modo, el relé de interfaz separa el circuito de control del PLC del circuito de potencia de la válvula. La apertura de la válvula produce la caída de presión en la línea que pone en marcha las bombas (Figura 3-5-5-1), por lo que la válvula es el elemento que, en la práctica, inicia y termina cada ciclo de llenado. Las válvulas tienen un

diámetro nominal de 2 pulgadas (DN50), coincidente con la red de cañerías de cobre, lo que facilita su montaje sin reducciones. Su selección consideró la compatibilidad con el montaje en la red existente, la idoneidad del material para el paso del agua y la posibilidad de ser comandadas directamente por el PLC, lo que permite integrarlas al control automático del llenado. Frente a una válvula de compuerta, la válvula de bola ofrece un mejor sellado en aplicaciones de accionamiento frecuente y un cierre más rápido (un cuarto de vuelta), lo que reduce el riesgo de fugas. Como las válvulas se ubican en la línea de descarga de las bombas, cuando están cerradas soportan la presión que estas mantienen en la línea, igual a la consigna de presión configurada, de 1 bar. Como criterio de diseño, se consideró que la presión nominal de las válvulas debía ser al menos el doble de ese valor.



Figura 3-5-4-1; Electroválvula de llenado tipo bola.

3.5.5 Bombas DAB ESYBOX MAX 60/120T

Para el llenado de los estanques de reserva se utilizan dos bombas DAB ESYBOX MAX 60/120T, de alimentación trifásica de 380 a 480 V, con una potencia máxima de 2,65 kW, una corriente máxima de 4,2 A, una altura de elevación máxima de 7,7 bar y un caudal máximo de

300 l/min. Estas bombas incorporan un control electrónico de tipo inversor que, a partir de los sensores de presión ubicados en la aspiración y en la impulsión, regula la velocidad del motor para mantener constante la presión de impulsión en el valor de ajuste (*set point*). El valor de ajuste de fábrica es de 3,0 bar; en este proyecto, se configuró en 1,0 bar y se escribe desde el PLC (Figura 3-6-1), que recibe la consigna ingresada por el operador en la HMI y la transmite a las bombas mediante Modbus RTU, a través del accesorio Esy I/O. Uno de los principales criterios de selección fue la eficiencia energética: el inversor adapta la velocidad de la bomba a la demanda, que se detecta como una caída de presión, con lo que evita los arranques directos a plena carga y reduce el consumo eléctrico en los periodos de baja demanda. Además, como el control de presión está integrado en la propia bomba, no fue necesario programar un lazo PID en el PLC. Basta con definir el valor de ajuste, y el PLC se limita a habilitar o deshabilitar las bombas mediante su entrada de deshabilitación, a supervisarlas (estado, presión, flujo y número de bombas en falla) y a enviar los comandos de consigna y de reset de fallas. Otro criterio relevante fue la posibilidad de operar como sistema multibomba. Según el fabricante, hasta cuatro equipos pueden formar un grupo de bombeo con un colector de impulsión común y comunicarse entre sí de forma inalámbrica, lo que permite aumentar las prestaciones hidráulicas respecto de una bomba individual, fraccionar la potencia y asegurar la continuidad del servicio en caso de falla de uno de los equipos. Esta última característica es especialmente importante en un recinto hospitalario, donde el suministro de agua no puede interrumpirse. Finalmente, las bombas incorporan protecciones contra el funcionamiento en seco, la congelación, los ciclos repetitivos de arranque y parada (*anti-cycling*), las sobrecorrientes en el motor, las tensiones de alimentación anormales y la sobretemperatura. Esto reduce el riesgo de daño de los equipos y evita tener que implementar estas protecciones en el PLC.



Figura 3-5-5-1; Bombas DAB ESYBOX MAX 60/120T.

3.6 Especificaciones y justificación de selección del PLC

El PLC seleccionado es una unidad central Haiwell T16S2R-e, variante con alimentación en corriente alterna y puerto Ethernet integrado (sufijo “-e”). Se alimenta con 100 a 240 VAC, 50/60 Hz, lo que es compatible con la alimentación disponible en el tablero. Posee 8 entradas digitales de 24 VDC, con aislamiento óptico por canal y tiempo de respuesta configurable, y 8 salidas digitales a relé. Cada relé admite una carga resistiva máxima de 2 A por punto (8 A por común de cuatro puntos), con tensiones de hasta 250 VAC o 30 VDC. En cuanto a comunicaciones, dispone de un puerto Ethernet RJ-45 (Modbus TCP/IP) y dos puertos seriales integrados, uno RS232 (COM1) y uno RS485 (COM2), ampliables hasta cinco puertos. Además, admite hasta siete módulos de expansión, que se conectan mediante el bus de expansión. Cuenta con indicadores LED de estado (PWR, RUN, COM y ERR) y con una inmunidad a interferencias de ±2500 V frente a transitorios rápidos (EFT) y a sobretensiones (*surge*) en la alimentación alterna. La CPU no incorpora entradas analógicas, por lo que estas se agregan mediante el

módulo S04XA (Figura 3-6-1-1). La selección de este modelo se fundamenta en los requerimientos de señales del sistema. Las entradas digitales cubren las señales discretas necesarias: la parada (X0), los interruptores de nivel alto (X2 y X4; Figura 3-5-3-1) y los interruptores de nivel bajo (X1 y X3). Así, de las 8 entradas se utilizan 5 y quedan 3 libres (37,5 % del total) para futuras ampliaciones. Las salidas digitales activan las electroválvulas de llenado (Y0 e Y1; Figura 3-5-4-1) y la señal de deshabilitación de las bombas (Y4; Figura 3-5-5-1), por lo que quedan 5 salidas libres para controlar otros equipos en el futuro. Las salidas a relé permiten conmutar cargas de distinta naturaleza y tensión, tanto en corriente alterna como continua, y ofrecen aislamiento entre la carga y la electrónica del PLC. Como en esta aplicación las salidas conmutan con baja frecuencia, la vida útil mecánica de los relés no constituye una limitación. El puerto Ethernet integrado del modelo “-e” fue fundamental para implementar la red de comunicación descrita. Los tres nodos de la red Ethernet, el PLC de la Sala de reservas (192.168.1.138), su HMI (192.168.1.51) y el PLC de la Sala de bombas (192.168.1.118), se interconectan en un switch industrial compacto PLANET ISW-500T (Figura 3-5-1-1), de 5 puertos 10/100 Mbps, diseñado para operar entre −40 y 75 °C y con alimentación redundante de 12 a 48 VDC o 24 VAC. A través de este switch, el PLC se comunica por Modbus TCP/IP con el PLC de la Sala de bombas, frente al cual actúa como cliente; con la HMI, en cambio, actúa como servidor: es la HMI la que lee y escribe los registros del PLC, por lo que el programa no requiere bloques de comunicación hacia ella. Esta arquitectura permite cumplir con los requisitos de telemetría y control remoto. Como la red utiliza tres de los cinco puertos del switch, quedan dos disponibles para incorporar nuevos equipos. Por su parte, el puerto serial RS485 (COM2) se dedica a la comunicación Modbus RTU con las bombas ESYBOX a través del Esy I/O, de modo

que el tráfico de cada red queda separado. El puerto RS232 (COM1), que es además el puerto de programación por cable del PLC, queda disponible para otros usos.



Figura 3-6-1; PLC Haiwell T16S2R-e.

3.6.1 Módulo de expansión analógico S04XA

El módulo de expansión S04XA de Haiwell agrega al PLC (Figura 3-6-1) la capacidad de adquirir señales analógicas. En este proyecto recibe la señal de corriente de 4 a 20 mA que entregan los transmisores de presión hidrostática (Figura 3-5-2-1) instalados en los estanques de reserva. El sistema requiere exactamente dos entradas analógicas, una para el transmisor de cada estanque de reserva, y el módulo S04XA, con sus dos entradas analógicas (AI), satisface este requisito sin canales de entrada sobrantes ni faltantes. Su función es digitalizar la señal de los transmisores, convirtiéndola en un código digital de 0 a 32000 con una resolución de 12 bits, para que el PLC la escale a unidades de ingeniería mediante la instrucción SC. Además, el módulo incorpora aislamiento optoeléctrico entre los circuitos analógicos y la parte digital (no entre canales), lo que protege a la CPU frente al ruido eléctrico proveniente del campo y

contribuye a la confiabilidad de las mediciones en las que se basan las decisiones automáticas del sistema.

Seleccionar una CPU con suficientes E/S digitales y agregar un módulo solo para las funciones analógicas necesarias corresponde a un diseño modular, que evita adquirir canales analógicos integrados que no se utilizarían. El módulo se conecta al PLC a través del bus de expansión, lo que mantiene un diseño de hardware simple y ordenado. Las dos salidas analógicas (AO) del módulo no se utilizan en la estrategia actual de presión constante, ya que esa regulación la realizan los inversores de las bombas (Figura 3-5-5-1). Sin embargo, representan una capacidad disponible para una futura ampliación; por ejemplo, para controlar actuadores proporcionales (válvulas de control moduladoras) o para implementar un lazo de control PID desde el PLC sin necesidad de adquirir nuevo hardware.

La combinación del PLC Haiwell T16S2R-e (CPU con E/S digitales, salidas a relé y comunicación Ethernet) y el módulo S04XA (2 AI y 2 AO) constituye una solución técnica adecuada para este proyecto, ya que cubre exactamente los requisitos de señales del sistema. Las entradas analógicas del módulo se configuraron para digitalizar las señales de corriente de 4 a 20 mA de los transmisores de presión, con una precisión de 0,2 % de la escala completa según el fabricante, lo que permite una medición confiable del nivel en los estanques. La incorporación de este módulo fue necesaria para implementar la estrategia de control de llenado, que se basa en la medición continua y en tiempo real del nivel del agua mediante los transmisores de presión. En conjunto, el sistema reúne la robustez, la precisión, las capacidades de comunicación integradas y el potencial de crecimiento que requiere un sistema crítico en un entorno hospitalario.



Figura 3-6-1-1; Módulo de expansión analógico S04XA.

3.7 Integración con bombas DAB ESYBOX MAX

El ESYBOX MAX (Figura 3-5-5-1) es un sistema integrado formado por una electrobomba centrífuga vertical de tipo multietapa, un circuito electrónico que la controla y un vaso de expansión. Además, la bomba dispone de conexión Wi-Fi y Bluetooth para el control remoto a través de DConnect Cloud y, para una mejor experiencia de uso con dispositivos móviles, a través de una aplicación específica. La aplicación y DConnect Cloud también permiten usar funciones adicionales que no están disponibles directamente en la pantalla del equipo. La electrobomba integrada es de tipo multirrotor y está accionada por un motor eléctrico trifásico enfriado por agua. La refrigeración del motor por agua, y no por aire, reduce el ruido del sistema y permite instalarlo en espacios no ventilados. Según las características técnicas del fabricante, la presión máxima de servicio (PN) es de 12 bar, y la altura de elevación máxima del modelo ESYBOX MAX 60/120T es de 7,7 bar.

El control electrónico integrado es de tipo inversor y utiliza dos sensores de presión (uno en la aspiración y otro en la impulsión) y un sensor de temperatura. Mediante estos sensores, el sistema se enciende y se apaga automáticamente según la demanda del servicio, manteniendo

constante la presión de impulsión. El fabricante entrega el equipo configurado para satisfacer la mayoría de los casos de instalación, con los siguientes valores:

- Valor de ajuste (*set point*, SP): 3,0 bar.
- Reducción de presión para el reencendido (RP): 0,3 bar.

En este proyecto, el valor de ajuste se configuró en 1,0 bar, el mínimo admitido por el equipo. La presión de entrada debe ser siempre inferior a la presión máxima en aspiración admitida por la bomba, que es de 5 bar. Cada modelo se caracteriza por un valor de ajuste máximo realizable sin que la aspiración esté presurizada. El usuario puede configurar el valor de ajuste desde 1,0 bar hasta la presión máxima de servicio (PN), es decir, incluso por sobre la presión que la bomba puede generar por sí sola, lo que permite usarla como bomba de presión. El funcionamiento es el siguiente:

- Si el valor de ajuste configurado es inferior a la presión máxima realizable por la bomba, el sistema regula a la presión configurada.
- Si el valor de ajuste configurado es mayor que la presión realizable por la bomba, solo se alcanzará con la ayuda de una presión en la entrada.

A partir del valor de ajuste configurado y de la presión medida en la aspiración, la bomba determina si podrá alcanzar el valor deseado. Si no puede alcanzarlo debido a una presión de aspiración insuficiente, sigue suministrando agua a la presión que logra alcanzar y muestra en la página principal de la pantalla el símbolo intermitente del manómetro.

En cuanto a las conexiones eléctricas, para mejorar la inmunidad al posible ruido eléctrico emitido hacia otros equipos, se aconseja utilizar una línea eléctrica separada para alimentar el equipo. La instalación debe realizarse según las indicaciones del manual y en conformidad con las leyes, directivas y normativas vigentes. El equipo contiene un inversor en

cuyo interior hay tensiones continuas y corrientes con componentes de alta frecuencia; por ello, el interruptor diferencial de protección del sistema debe dimensionarse correctamente según las características indicadas por el fabricante.

Para la primera puesta en marcha se deben realizar las conexiones hidráulicas y eléctricas (sin energizar), llenar la bomba, abrir un punto de consumo en la impulsión, energizar el equipo y conectarse a la bomba mediante la aplicación para realizar la configuración asistida. Al encenderse, el sistema verifica la presencia de agua en la impulsión; si detecta un flujo regular, la bomba se ceba y comienza a presurizar. A partir de entonces funciona según los parámetros configurados: arranca automáticamente al abrirse un punto de consumo, entrega agua a la presión configurada (SP), la mantiene constante, aunque se abran otros puntos de consumo y se detiene automáticamente tras el tiempo T2 (10 s de fábrica), una vez alcanzadas las condiciones de apagado. En este proyecto, el punto de consumo corresponde a las válvulas de llenado (Figura 3-5-4-1) de los estanques de reserva: la apertura de una de ellas pone en marcha las bombas, y su cierre permite que se detengan.

La interfaz de usuario está formada por un teclado con una pantalla de 2,8" y tres LED de señalización: POWER, COMM y ALARM. La pantalla muestra las magnitudes y los estados del dispositivo. El botón MODE permite pasar a los elementos siguientes de cada menú y, si se presiona durante al menos 1 s, volver al elemento anterior. El botón SET permite salir del menú actual, y los botones “∨” y “∧” disminuyen o aumentan el parámetro seleccionado, siempre que sea modificable. El LED blanco (POWER) encendido fijo indica que el equipo está energizado, e intermitente, que está deshabilitado, como ocurre cuando el PLC (Figura 3-6-1) lo deshabilita mediante la salida Y4. El LED rojo (ALARM) encendido fijo indica que el equipo está bloqueado por un error. El LED azul (COMM) encendido fijo indica que la comunicación

inalámbrica está activa; intermitente lento, que no está disponible por problemas; e intermitente rápido, que hay una asociación con otros dispositivos inalámbricos en curso.

3.8 Configuración de las comunicaciones

El sistema utiliza dos redes de comunicación industrial, cuyos fundamentos se presentaron en la sección 2.3.4: una red Modbus TCP/IP sobre Ethernet, que enlaza el PLC de la Sala de reservas con su HMI y con el PLC de la Sala de bombas, y una red Modbus RTU sobre RS485, que enlaza el PLC (Figura 3-6-1) con las bombas (Figura 3-5-5-1) a través del accesorio Esy I/O. Esta sección describe la topología de comunicación, la estructura del programa del PLC y la configuración de cada red.

3.8.1 Topología de comunicación

La siguiente figura muestra la topología de comunicación implementada, con la dirección IP de cada equipo de la red Ethernet y el enlace serial con las bombas (Figura 3-5-5-1).



Figura 3-8-1-1; Topología de comunicación del sistema.

3.8.2 Estructura del programa del PLC

El programa del PLC de la Sala de reservas se organiza en un programa principal (PGB:Principal) y cinco subprogramas (subrutinas), cada uno dedicado a una parte del proceso. En la única red del programa principal (*Network 1*, “Inicio de sub rutinas”) se encuentran cinco instrucciones CALL (*Call subroutine*), conectadas en paralelo y sin condición de habilitación. Por ello, todas se ejecutan en cada ciclo de scan. En cada bloque CALL, el parámetro SubP indica el nombre del subprograma que se llama: Tanque 1, Tanque 2, Bombas, Com sala de bombas y Comunicación Bombas.

Los subprogramas Tanque 1 y Tanque 2 escalan la señal analógica de nivel de cada estanque de reserva y controlan la apertura de su válvula de llenado (Figura 3-5-4-1). El subprograma Bombas contiene la lógica de habilitación de las bombas (Figura 3-5-5-1), que el PLC (Figura 3-6-1) aplica mediante la salida Y4, conectada a su entrada de deshabilitación. El subprograma Com sala de bombas gestiona la comunicación Modbus TCP/IP con el PLC de la Sala de bombas (192.168.1.118). Por último, el subprograma Comunicación Bombas gestiona la comunicación Modbus RTU con las bombas ESYBOX a través del accesorio Esy I/O. Como el PLC funciona en modo de scan cíclico, al terminar la ejecución de todos los subprogramas el ciclo vuelve a comenzar desde la primera red del programa principal.

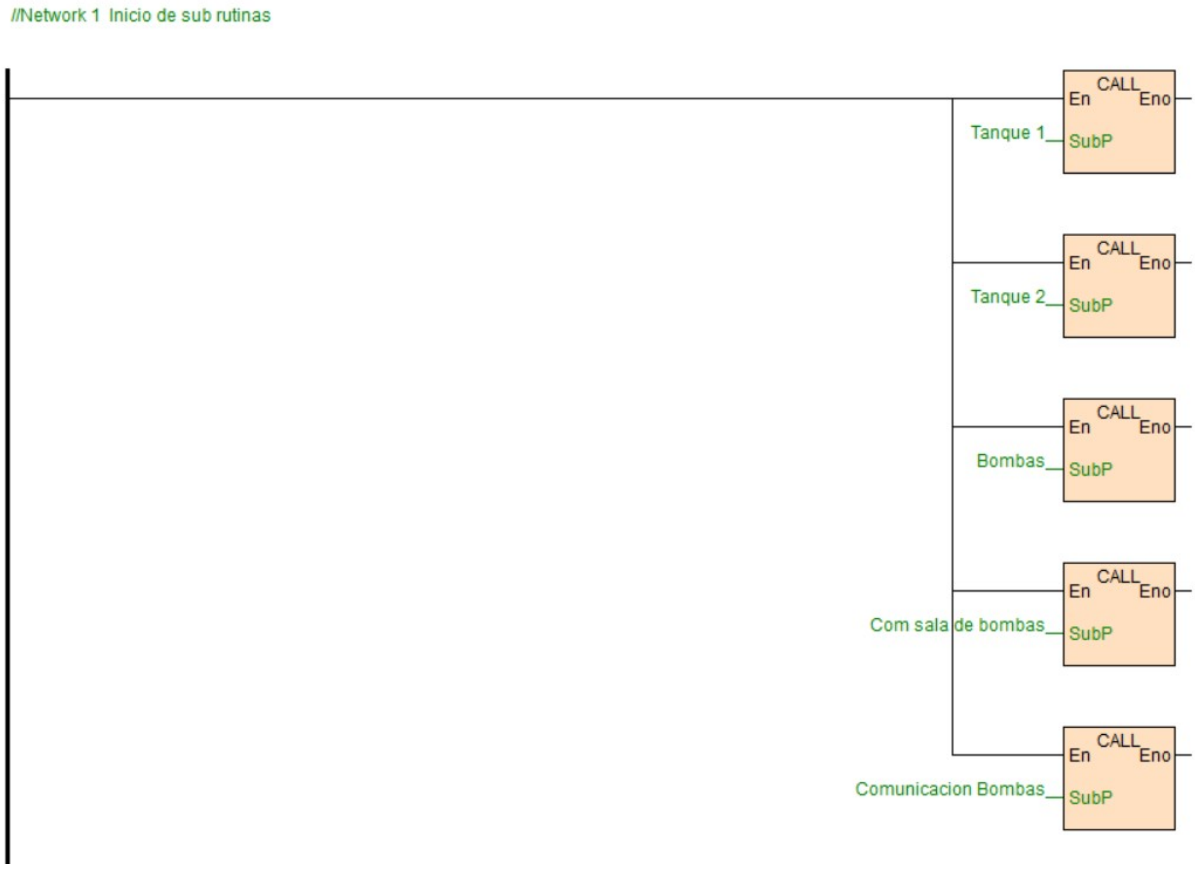


Figura 3-8-2-1; Llamada a los subprogramas desde el programa principal.

3.8.3 Comunicación Modbus TCP/IP

Una de las señales de control que intervienen en el llenado automático de los estanques de reserva llega al PLC de la Sala de reservas (192.168.1.138), donde se realizó la automatización, desde el PLC de la Sala de bombas (192.168.1.118), ubicado junto a los estanques principales, mediante el protocolo Modbus TCP/IP. A través de este protocolo, el PLC .138, que actúa como cliente, lee con la instrucción TCPMDR las señales discretas de nivel bajo de los estanques principales (M42 y M43), que intervienen en la habilitación de las bombas (Figura 3-5-5-1). Además, con la instrucción TCPMDW, el PLC .138 escribe en el PLC .118 dos marcas de memoria: un pulso de comunicación (M40), generado con el reloj de 1 s (SM5), y la

señal de falla general (M41), que se activa ante fallas de las bombas, nivel bajo en los estanques de reserva o accionamiento de la parada. Como M40 cambia cada segundo, el PLC .118 puede supervisar que la comunicación se mantiene activa.



Figura 3-8-3-1; Generación del pulso de comunicación con el reloj de 1 s.

Para implementar esta comunicación se incorporaron al programa dos bloques: TCPMDR (lectura) y TCPMDW (escritura). En el bloque TCPMDR, el parámetro IP contiene la dirección 192.168.1.118, que corresponde al PLC de la Sala de bombas, desde donde se realizan las lecturas. El parámetro Code, con valor 2, corresponde a la función Modbus 02 (*Read Discrete Inputs*), es decir, la lectura de estados de bit. El parámetro Read, con valor 3232, es la dirección inicial de lectura en el PLC remoto. Según la tabla de direcciones de comunicación de Haiwell, las marcas auxiliares se direccionan por Modbus a partir de la dirección 3072 (M0), por lo que

3232 corresponde a la marca M160 de ese PLC. El parámetro N, con valor 2, indica que se leen dos datos consecutivos (M160 y M161), que se almacenan en el PLC local (Figura 3-6-1) a partir del componente inicial de recepción (Rxd = M42), es decir, en M42 y M43. Estas marcas representan las señales de nivel bajo de los estanques principales TK1 y TK2. Finalmente, el parámetro Slave, con valor 1, es la dirección del esclavo (*Unit ID*) dentro de la dirección IP indicada, que corresponde al PLC de la Sala de bombas.



Figura 3-8-3-2; Bloque TCPMDR de lectura Modbus TCP/IP.

En el bloque TCPMDW (escritura), complementario al de lectura, el parámetro IP contiene la misma dirección (192.168.1.118), que corresponde al equipo servidor hacia el cual se dirige la comunicación. El parámetro Code, con valor 15, corresponde a la función Modbus 15 (*Write Multiple Coils*), que permite escribir varios bits consecutivos con una sola instrucción. El parámetro Write, con valor 3222, es la dirección inicial de destino de la escritura en el PLC remoto. Según la tabla de direcciones de comunicación de Haiwell, las marcas auxiliares se direccionan por Modbus a partir de la dirección 3072 (M0), por lo que 3222 corresponde a la marca M150 de ese PLC. El parámetro Val, con valor M40, es el componente inicial de los datos a escribir, ubicado en el PLC local, y ocupa N componentes consecutivos. El parámetro N, con

valor 2, indica que se escriben dos bits, M40 y M41, que se transfieren a M150 y M151 del PLC remoto. Como el bloque no tiene condición de habilitación, la escritura se repite de forma continua, y el valor de M40 cambia cada segundo por efecto del reloj SM5. Finalmente, el parámetro Slave, con valor 1, igual que en el bloque de lectura, es la dirección del esclavo dentro de la IP indicada, que corresponde al PLC de la Sala de bombas.

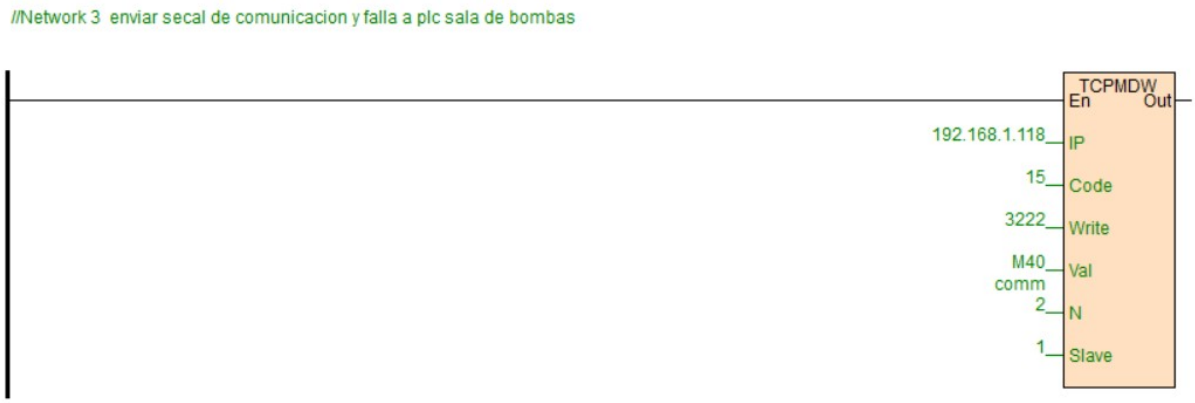


Figura 3-8-3-3; Bloque TCPMDW de escritura Modbus TCP/IP.

3.8.4 Comunicación Modbus RTU

Para que las bombas ESYBOX (Figura 3-5-5-1) puedan comunicarse mediante el protocolo Modbus RTU sobre RS485, requieren el accesorio Esy I/O, que actúa como pasarela (*gateway*) entre la bomba y la red Modbus. En el siguiente diagrama se representa la arquitectura de comunicación implementada en el proyecto.

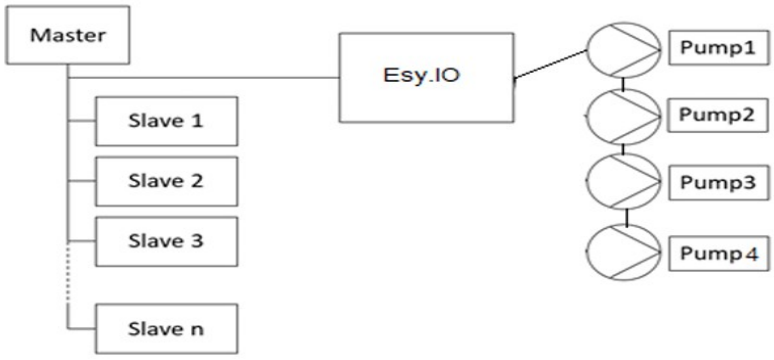


Figura 3-8-4-1; Topología de la red Modbus RTU.

A través del accesorio Esy I/O, la bomba permite transferir información y comandos relativos a su estado y al del grupo de bombeo al que eventualmente pertenezca.

La lógica que inicia la comunicación Modbus con las bombas se basa en un generador de pulsos y un contador. En la primera red (*Network 1*), un contacto normalmente cerrado asociado a T1 habilita un temporizador TON con base de tiempo de 100 ms y valor preestablecido (Pt) de 1. Cuando el temporizador completa su tiempo, T1 se activa, abre su propio contacto y reinicia el temporizador, de modo que genera un pulso breve cada 100 ms. En la segunda red (*Network 2*), un contacto normalmente abierto de T1 incrementa, con cada pulso, el contador ascendente CTU (C0), con un valor preestablecido (PV) de 10; su valor actual (CV0) cuenta de 0 a 10. Este valor se utiliza luego como condición de habilitación de cada bloque de comunicación.

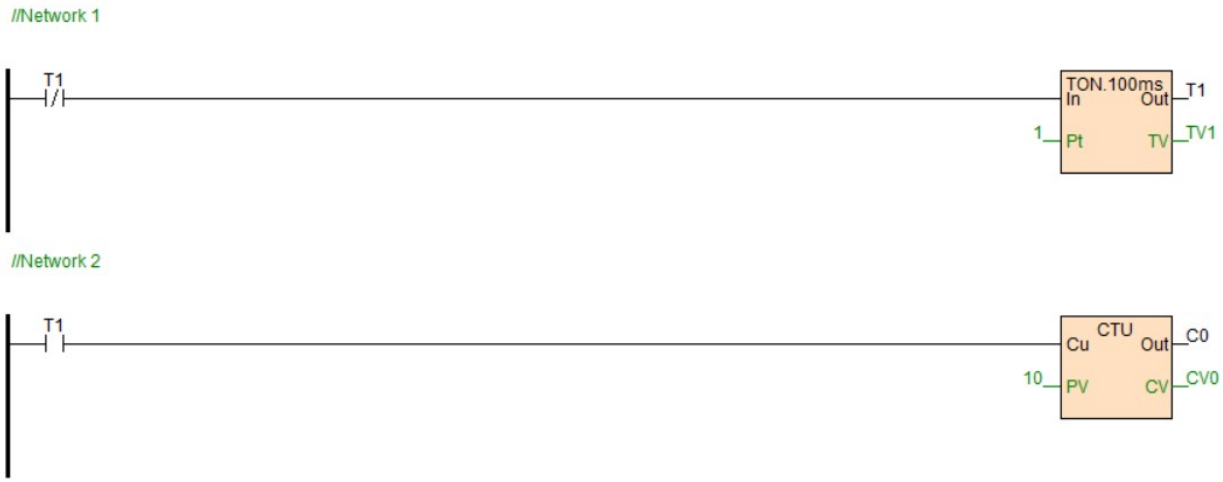


Figura 3-8-4-2; Generador de pulsos y contador de la secuencia de comunicación.

Una vez que el contador C0 comienza a contar, su valor actual (CV0) se incrementa en una unidad con cada pulso de T1. Cada valor de CV0, desde 1 hasta 9, habilita un único bloque de comunicación (lectura de estado, presión o flujo de cada bomba, lectura del número de bombas en falla, o escritura del reset y de la consigna), de modo que los bloques se ejecutan de forma secuencial. Con CV0 = 10 el contador se reinicia y el ciclo vuelve a comenzar. Para comprender mejor esta secuencia, primero se describen los registros y las funciones Modbus admitidos por el accesorio Esy I/O.

Especificaciones Modbus	Descripción	Notas
Protocolo	Modbus RTU	Solo se permite el modo "Slave"
Conexiones	Caja de bornes	
Interfaz física	RS485	
Dirección slave	De 1 (defecto) a 247	
Velocidad permitida	2400, 4800, 9600, 19200, 38400, 57600, 115200	
Start bit	1	
Data bit	8	
Stop bit	1,2	
Paridad	Ninguna, pares, impares	
Sample Rate	< 1 minuto en lectura, < 2 segundos en escritura	

Figura 3-8-4-3; Parámetros de comunicación admitidos por el Esy I/O.

Los registros admitidos por el accesorio Esy I/O son de 16 bits, y las funciones Modbus soportadas son la 03 (*Read holding registers*) para la lectura y la 06 (*Write input register*) para la escritura.

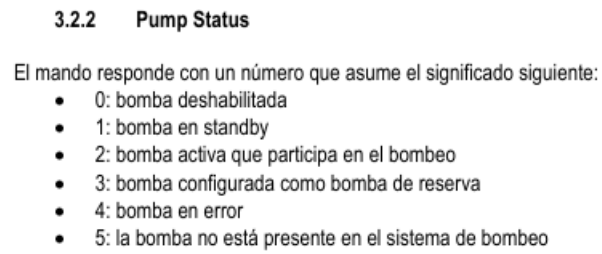
Type	code	Hex	Name
16-bit data (registers)	03	0x03	Read holding registers
	06	0x06	Write input register

Figura 3-8-4-4; Funciones Modbus admitidas por el Esy I/O.

Cuando el contador C0 comienza a contar, su valor actual (CV0) toma el valor 1, y esta condición habilita el primer bloque de comunicación MODR (Network 3, “Estado Bomba 1”). Con este bloque, el PLC de la Sala de reservas, que actúa como maestro Modbus, lee el estado de la bomba 1 a través del accesorio Esy I/O, el cual, como se indicó, funciona como pasarela (*gateway*) de la comunicación serial con las bombas.

El parámetro Slave, con valor 1, es la dirección del esclavo con el que se comunica el PLC (Figura 3-6-1), es decir, el Esy I/O. El parámetro Code, con valor 3, corresponde a la función Modbus 03 (*Read holding registers*), que indica al esclavo que debe leer registros de retención de 16 bits. El parámetro Read, con valor 64, es la dirección del registro que se lee. En el manual Modbus de ESYLINE, el registro de estado de la bomba 1 figura en hexadecimal (0x40), y debe expresarse en decimal ($4 \times 16 = 64$) para ingresarlo en el bloque MODR.

El fabricante define el estado de la bomba mediante un número del 0 al 5: 0, bomba deshabilitada; 1, bomba en espera (*standby*); 2, bomba activa participando en el bombeo; 3, bomba configurada como bomba de reserva; 4, bomba en error; y 5, bomba no presente en el sistema.



3.2.2 Pump Status

El mando responde con un número que asume el significado siguiente:

- 0: bomba deshabilitada
- 1: bomba en standby
- 2: bomba activa que participa en el bombeo
- 3: bomba configurada como bomba de reserva
- 4: bomba en error
- 5: la bomba no está presente en el sistema de bombeo

Figura 3-8-4-5; Estados de la bomba según el manual Modbus ESYLINE.

El parámetro N indica la cantidad de registros consecutivos que lee el bloque MODR. En este caso N = 1, por lo que se lee un único registro de 16 bits, que se almacena en V100 (parámetro Rxd, componente inicial de recepción) y corresponde al estado de la bomba 1. El parámetro Protocol, con valor 38, es un código predefinido en el software de Haiwell que agrupa la configuración de la comunicación serial: protocolo Modbus RTU, velocidad de 9600 baudios, sin paridad, 8 bits de datos y 1 bit de parada. Esta configuración se encuentra entre las admitidas por el Esy I/O. Finalmente, el parámetro Port, con valor 2, corresponde al puerto serial RS485 (COM2) integrado en el PLC, que permite la comunicación entre el PLC y las bombas ESYBOX a través de la pasarela (*gateway*) Esy I/O.



Figura 3-8-4-6; Bloque MODR de lectura del estado de la bomba 1.

Los parámetros de los bloques MODR se describieron anteriormente; a continuación, se describen únicamente los parámetros Read y Rxd, ya que son los que cambian de valor en los siguientes bloques MODR.

En el bloque MODR asociado a la lectura de presión de la bomba 1 (Network 4), el parámetro Read tiene el valor 66, que corresponde a 0x42 en hexadecimal en el manual Modbus de ESYLINE. Ese registro (*VP Pump 1 Press Bar*) contiene la presión del sistema en la descarga medida por la bomba 1. Es un registro de solo lectura, con una escala de 0,1 bar, es decir, almacena la presión en décimas de bar. El manual asigna a este registro el código de error 02 (dirección inválida o no disponible en el momento de la solicitud). El valor leído se almacena, a través del parámetro Rxd, en el registro V101.



Figura 3-8-4-7; Bloque MODR de lectura de la presión de la bomba 1.

En el bloque MODR asociado a la lectura de flujo de la bomba 1 (Network 5), el parámetro Read tiene asignado el valor 68, que corresponde a 0x44 en hexadecimal en el manual Modbus de ESYLINE. Este registro (*Pump 1 Flow Liter*) contiene el flujo medido por la bomba 1; es de solo lectura, tiene el mismo código de error 02 descrito anteriormente y una escala de 1 l/min, por lo que el valor entero leído equivale directamente a litros por minuto. El valor se almacena, a través del parámetro Rxd, en el registro V102.



Figura 3-8-4-8; Bloque MODR de lectura del flujo de la bomba 1.

En el bloque MODR asociado a la lectura de estado de la bomba 2 (Network 6), el parámetro Read tiene asignado el valor 80, que corresponde a 0x50 en hexadecimal en el manual Modbus de ESYLINE (registro *Pump 2 status*, de solo lectura). Como se describió para la bomba 1, este registro devuelve un número del 0 al 5, en el que cada valor corresponde a un estado diferente de la bomba. El valor leído se almacena, a través del parámetro Rxd, en el registro V103.



Figura 3-8-4-9; Bloque MODR de lectura del estado de la bomba 2.

En el bloque MODR asociado a la lectura de presión de la bomba 2 (Network 7), el parámetro Read tiene asignado el valor 82, que corresponde a 0x52 en hexadecimal en el manual Modbus de ESYLINE. Este registro (*VP Pump 2 Press Bar*) contiene la presión del sistema en la descarga medida por la bomba 2. Es de solo lectura, tiene el código de error 02 y una escala de 0,1 bar, es decir, almacena la presión en décimas de bar. El valor medido se almacena, a través del parámetro Rxd, en el registro V104.



Figura 3-8-4-10; Bloque MODR de lectura de la presión de la bomba 2.

En el bloque MODR asociado a la lectura de flujo de la bomba 2 (Network 8), el parámetro Read tiene asignado el valor 84, que corresponde a 0x54 en hexadecimal en el manual Modbus de ESYLINE. Este registro (*Pump 2 Flow Liter*) contiene el flujo medido por la bomba 2; es de solo lectura, tiene el código de error 02 y una escala de 1 l/min, por lo que el valor entero leído equivale directamente a litros por minuto. El valor se almacena, a través del parámetro Rxd, en el registro V105.



Figura 3-8-4-11; Bloque MODR de lectura del flujo de la bomba 2.

En el bloque MODR asociado a la lectura del número de bombas en falla (Network 9), el parámetro Read tiene asignado el valor 3, que corresponde a 0x03 en el manual Modbus de ESYLINE (registro *Pump Fault Number*, de solo lectura). Este registro entrega directamente la cantidad de bombas del sistema que se encuentran en falla, sin escala asociada. El valor se almacena, a través del parámetro Rxd, en el registro V106.



Figura 3-8-4-12; Bloque MODR de lectura del número de bombas en falla.

El siguiente bloque de comunicación, MODW (Modbus Write; Network 10, “Reset Bomba”), se habilita con CV0 = 8 y está asociado a la escritura del comando de reset de fallas de las bombas. A diferencia de los bloques anteriores, que leen datos del esclavo mediante la instrucción MODR (Modbus Read), el bloque MODW escribe datos en el esclavo.

El parámetro Slave tiene el valor 1, por lo que la escritura se dirige al mismo esclavo de los bloques anteriores, el Esy I/O. El parámetro Code tiene el valor 6, que corresponde a la función Modbus 06 (*Preset single register*) y permite escribir un único registro de 16 bits. El parámetro Write tiene el valor 256, equivalente a 0x100 en hexadecimal. Según el manual

Modbus de ESYLINE, ese es el registro *Reset Fault*: al escribir en él un valor distinto de 0 se solicita el restablecimiento de las fallas de los inversores conectados.

El parámetro Val tiene asignado el registro V108, que es el componente de origen del dato que se transmite al esclavo. Este registro recibe, mediante una instrucción MOV (Network 14), el valor ingresado desde la HMI en la variable V1001, que debe ser un número distinto de 0 para solicitar el reset. El parámetro N, con valor 1, indica que se escribe un solo dato de 16 bits. El parámetro Protocol, con valor 38, corresponde a la misma configuración de comunicación de los bloques de lectura (9600 baudios, sin paridad, 8 bits de datos, 1 bit de parada, modo Modbus RTU). Finalmente, el parámetro Port, con valor 2, indica que la comunicación se realiza por el puerto serial RS485 (COM2) del PLC, igual que en los demás bloques, hacia las bombas ESYBOX a través del Esy I/O.



Figura 3-8-4-13; Bloque MODW de escritura del reset de fallas.

El siguiente bloque de comunicación, MODW (Network 11, “Set Point”), se habilita con CV0 = 9 y está asociado a la escritura de la consigna de presión de las bombas. Como los

parámetros Slave, Code, N, Protocol y Port tienen los mismos valores que en el bloque de reset, a continuación, se describen únicamente los parámetros Write y Val, que son los que cambian.

El parámetro Write tiene asignado el valor 289, que corresponde a 0x121 en hexadecimal en el manual Modbus de ESYLINE. Este registro (*SP Setpoint Pressure Bar*) permite fijar la consigna de presión de trabajo de las bombas. Es de lectura y escritura y tiene una escala de 0,1 bar, es decir, almacena la presión en décimas de bar.

Finalmente, el parámetro Val tiene asignado el registro V107, que es el componente de origen del dato que se transmite al esclavo. Este registro recibe, mediante una instrucción MOV (Network 13), la consigna ingresada desde la HMI en la variable V1000. El operador ingresa la consigna en bar con un decimal, y la HMI la almacena como un entero en décimas de bar (por ejemplo, 1,0 bar se guarda como 10). Como este formato coincide con la escala del registro, no se requiere conversión en el PLC.



Figura 3-8-4-14; Bloque MODW de escritura de la consigna de presión.

Finalmente, en la red 12 (Network 12, “secuencia de comunicación”) se reinicia la secuencia de comunicación. Un contacto de comparación de igualdad habilita una instrucción MOV (*Move*) cuando el valor actual del contador (CV0) es igual a 10. Esta instrucción transfiere el valor 0, indicado en el parámetro In, al registro CV0, indicado en el parámetro Out. Así, el contador vuelve a su valor inicial y, con el siguiente pulso de T1, la cuenta comienza nuevamente. Como el reinicio ocurre en el mismo ciclo de scan en que CV0 alcanza el valor 10, ningún bloque de comunicación se habilita con ese valor. De este modo, los nueve bloques de comunicación se ejecutan en forma cíclica y secuencial, y cada uno se habilita una vez por ciclo, que dura aproximadamente 1 s (10 pulsos de 100 ms).



Figura 3-8-4-15; Reinicio de la secuencia de comunicación.

En las redes 13 y 14 (*Network 13* y *Network 14*) se cargan los datos que luego escriben los bloques MODW. Ambas redes contienen una instrucción MOV sin condición de habilitación, por lo que se ejecutan en cada ciclo de scan. En la red 13 (“set de memoria presion bombas”), la instrucción MOV copia el contenido del registro V1000 (parámetro In) en el registro V107 (parámetro Out). V107 es el componente de origen (Val) del bloque de escritura de la consigna. En la red 14 (“set de memoria reset bombas”), la instrucción MOV copia el contenido de V1001 en V108, que es el componente de origen del bloque de reset.

Los registros V1000 y V1001 provienen de la HMI de la Sala de reservas, donde el operador puede modificar sus valores mediante cuadros de entrada numérica. En V1000 se ingresa la consigna de presión en bar, con un decimal, y la HMI la almacena como un entero en décimas de bar (por ejemplo, 1,0 bar se guarda como 10). En V1001 se ingresa un número distinto de 0 para solicitar el reset de fallas de las bombas. Ambos registros se encuentran dentro del rango retentivo por defecto del PLC (V1000~V2047), por lo que conservan su valor ante un corte de energía.



Figura 3-8-4-16; Carga de la consigna de presión y del reset desde la HMI.

En la red 15 (Network 15, “suma de flujos”) se calcula el flujo total entregado por las dos bombas. La red contiene una instrucción ADD (*Addition*) sin condición de habilitación, por lo que se ejecuta en cada ciclo de scan. La instrucción suma el contenido del registro V102 (parámetro In1), que corresponde al flujo de la bomba 1, y el del registro V105 (parámetro In2), que corresponde al flujo de la bomba 2, y guarda el resultado en el registro V110 (parámetro Out,

“Suma de Flujos”). Como ambos valores se leen del Esy I/O con una escala de 1 l/min, la suma no requiere conversión y V110 expresa directamente el flujo total en litros por minuto.



Figura 3-8-4-17; Suma de los flujos de las bombas.

CAPÍTULO 4: CONCLUSIÓN Y RECOMENDACIONES

4.1 Conclusión

El presente trabajo de titulación cumplió con el objetivo general de diseñar e implementar un sistema de control automático basado en un PLC (Figura 3-6-1) para la Sala de reservas de agua sanitaria del Hospital Dr. Rafael Avaria Valenzuela. El sistema reemplaza la operación manual del llenado de los estanques de reserva, que dependía de la presencia constante de un operador, por un ciclo automático que integra instrumentación de campo, comunicaciones industriales, una interfaz HMI y una lógica de control desarrollada en lenguaje Ladder.

En relación con el primer objetivo específico, el análisis del sistema existente permitió identificar sus principales limitaciones: la dependencia del operador para cada ciclo de llenado, la ausencia de medición continua del nivel, la falta de alarmas ante condiciones anómalas y la exposición del personal a inspecciones presenciales. Estas limitaciones definieron los requerimientos del nuevo sistema y orientaron cada una de las decisiones de diseño posteriores.

En cuanto al segundo objetivo, los fundamentos teóricos permitieron justificar las principales decisiones técnicas del proyecto. La hidrostática respaldó el principio de medición adoptado, ya que la presión que ejerce la columna de agua sobre un transmisor (Figura 3-5-2-1) sumergido es proporcional a su altura. El estudio de la mecánica de fluidos, en particular de las curvas de la bomba y del sistema, de las leyes de afinidad y del golpe de ariete, justificó el uso de bombas con inversor integrado (Figura 3-5-5-1) y de válvulas con actuador eléctrico, mientras que los fundamentos de automatización y de comunicación industrial orientaron la programación del PLC y la configuración de las redes Modbus. Por último, la revisión del marco normativo

eléctrico y de seguridad laboral estableció las condiciones bajo las cuales se ejecutó la instalación.

Respecto del tercer objetivo, se diseñó una arquitectura de control distribuido en la que el PLC Haiwell T16S2R-e determina cuándo se llena cada estanque, mediante la apertura de su válvula, y habilita o deshabilita las bombas, mientras que las dos bombas DAB ESYBOX MAX 60/120T regulan la presión de forma autónoma con su inversor. Esta división de funciones fue una de las decisiones más acertadas del proyecto, ya que evitó programar un lazo PID en el PLC, simplificó la lógica y permitió aprovechar las protecciones propias de las bombas. La lógica de llenado combina dos medios de medición independientes en cada estanque: el transmisor de presión hidrostática, que gobierna el llenado en operación normal, y el interruptor de nivel alto (Figura 3-5-3-1), que impide el rebalse si la medición analógica falla. A ello se suma el cableado normalmente cerrado de los interruptores de nivel alto y de la parada, que hace que un corte de cable cierre las válvulas en lugar de pasar inadvertido.

En el ámbito de las comunicaciones, se implementaron dos redes complementarias. La red Modbus TCP/IP, construida en torno a un switch industrial (Figura 3-5-1-1), permite al PLC intercambiar señales con el PLC de la Sala de bombas, frente al cual actúa como cliente, y con la HMI, frente a la cual actúa como servidor. La red Modbus RTU sobre RS485, a través del accesorio Esy I/O, permite supervisar el estado, la presión y el flujo de cada bomba, y enviarles la consigna de presión y el comando de reset de fallas, mediante bloques de comunicación que se ejecutan en forma secuencial gobernados por un contador. Esta etapa dejó un aprendizaje importante: cada parámetro de programación debe contrastarse con la documentación técnica de los fabricantes, ya que de ello depende la compatibilidad entre equipos de distintas marcas.

En relación con el cuarto objetivo, el proyecto alcanzó la etapa de precomisionamiento. Se cargó el programa en el PLC y se realizaron pruebas en terreno que permitieron verificar la comunicación entre los equipos y la habilitación de las bombas según las condiciones programadas, incluida su deshabilitación mediante la salida Y4. El análisis de la lógica implementada permitió, además, identificar oportunidades de mejora para futuras etapas del sistema, que se presentan en las recomendaciones.

Finalmente, el desarrollo de este trabajo permitió al autor aplicar de forma integrada los conocimientos de instrumentación, control automático y comunicaciones industriales adquiridos durante la carrera, en un proyecto real y en un entorno de alta exigencia como un recinto hospitalario, donde la continuidad del suministro de agua es un requisito crítico. La participación en todas las etapas del proyecto, desde las visitas técnicas iniciales hasta el precomisionamiento, permitió comprender que una solución de automatización no se reduce a la programación del controlador: depende también de la correcta selección de los equipos, de la revisión rigurosa de su documentación técnica y de la verificación en terreno de cada decisión de diseño.

4.2 Recomendaciones

A partir del análisis del sistema implementado, se proponen las siguientes recomendaciones para su evolución en etapas futuras:

Ampliar la supervisión de las comunicaciones. Los bloques de comunicación disponen de una salida que indica si cada transacción se completó correctamente. Utilizarla para generar alarmas en la HMI permitiría al operador detectar de inmediato cualquier interrupción en el intercambio de datos con las bombas (Figura 3-5-5-1) o con el PLC de la Sala de bombas.

Supervisar la alimentación de la red. El switch industrial (Figura 3-5-1-1) dispone de un contacto de alarma por falla de alimentación. Conectarlo a una de las entradas libres del PLC (Figura 3-6-1) permitiría supervisar la red de comunicaciones con la misma lógica de seguridad intrínseca del resto del sistema.

Documentar la configuración de la HMI. Elaborar una tabla con las variables que la HMI lee y escribe en el PLC, su función y su formato facilitaría el mantenimiento y las futuras modificaciones del sistema.

Establecer un plan de mantenimiento preventivo. Se recomienda definir una rutina periódica de verificación de los transmisores (Figura 3-5-2-1), de los interruptores de nivel (Figura 3-5-3-1) y de las válvulas, junto con la capacitación del personal del hospital en la operación del sistema y en la interpretación de sus alarmas.

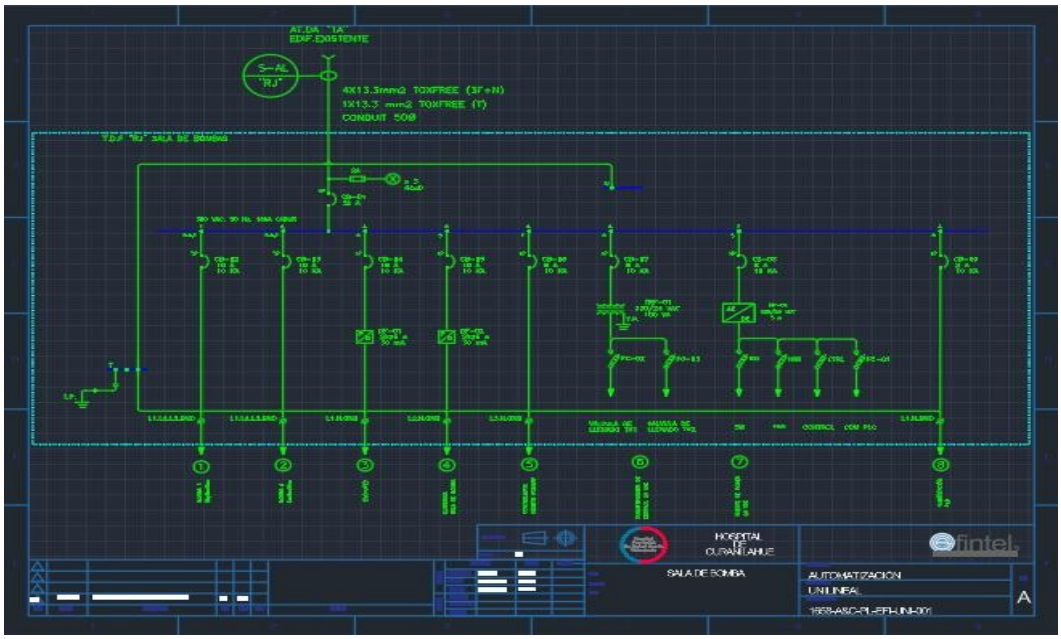
Linkografía

- Enfisica.com. (2024, 10 de septiembre). *Presión hidrostática en un fluido: definición, fórmula, principios y aplicaciones*. https://enfisica.com/hidrostatica/presion-hidrostatica-en-un-fluido-definicion-formula-principios-y-aplicaciones/.
- Bernabéu Jover, M. Á. (2013). *Bernoulli y pérdidas de carga* [Material docente]. Repositorio Institucional de la Universitat Politècnica de València (RIUNET). https://riunet.upv.es/server/api/core/bitstreams/3b47d3c3-9c55-487a-a103-edbc0f9d41b3/content.
- Gonzalez, P. (2025, 18 de abril). *NPSH en bombas: Conceptos fundamentales y aplicaciones prácticas*. Engi-Learn. https://www.engi-learn.com/post/npsh-bombas-conceptos-fundamentales-aplicaciones-practicas.
- González, J. (2023, 10 de marzo). *El golpe de ariete en mecánica de fluidos*. De Ingenierías. https://deingenierias.com/blog/el-golpe-de-ariete-en-mecanica-de-fluidos/.
- Superintendencia de Electricidad y Combustibles (SEC). (1997). *Reglamento de seguridad de las instalaciones de consumo de energía eléctrica* (Decreto N° 8). https://www.sec.cl/reglamento-de-seguridad-de-las-instalaciones-de-consumo-de-energia-electrica-decreto-08/.
- Chile. Ministerio del Trabajo y Previsión Social. (2019, 1 de enero). *Ley N° 16.744: Establece normas sobre accidentes del trabajo y enfermedades profesionales* (Texto actualizado al 23 de diciembre de 2017). Dirección del Trabajo. https://www.dt.gob.cl/portal/1626/articles-119819_Fiscalizador_06.pdf.

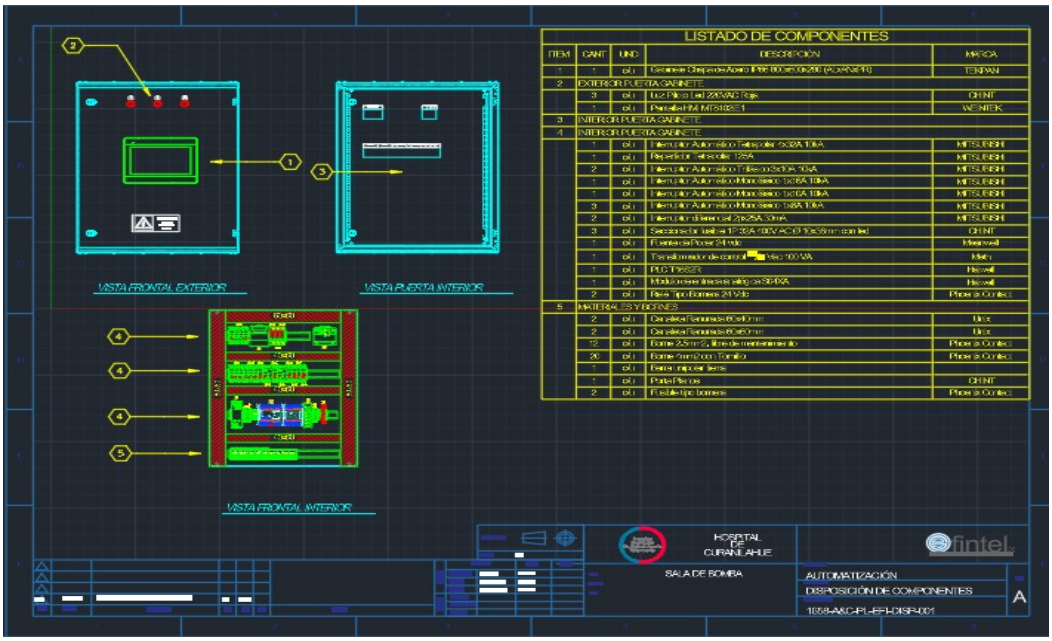
- Chile. Ministerio de Salud. (2020, 30 de julio). *Decreto Supremo N° 594: Aprueba reglamento sobre condiciones sanitarias y ambientales básicas en los lugares de trabajo* (Texto actualizado a julio de 2020). Instituto de Seguridad del Trabajo (IST). https://ist.cl/wp-content/uploads/2016/08/DECRETO-SUPREMO-594-ACTUALIZADO-2019.pdf.
- Chile. Dirección del Trabajo. (s.f.). *Reglamento sobre condiciones sanitarias y ambientales básicas en los lugares de trabajo (Decreto Supremo N° 594)*. https://www.dt.gob.cl/portal/1626/articles-127643_recurso_01.pdf.
- AISA, Equipo Técnico. (2017, noviembre). *Introducción al estándar IEC 61131-3* [Archivo PDF]. Instrumentación y Control. https://instrumentacionycontrol.net/wp-content/uploads/2017/11/IyCnet_Intro_estandar_IEC_61131-3.pdf.
- Fomento Empresas. (s.f.). *Proyectos EPC (Ingeniería, Procura y Construcción): Características, fases y ventajas*. https://www.fomentoempresas.com/proyectos-epc/.

Anexos

Anexo A – Diagrama unilineal de potencia



Anexo B – Diagrama de disposición de componentes



Anexo C – Diagrama elemental de control

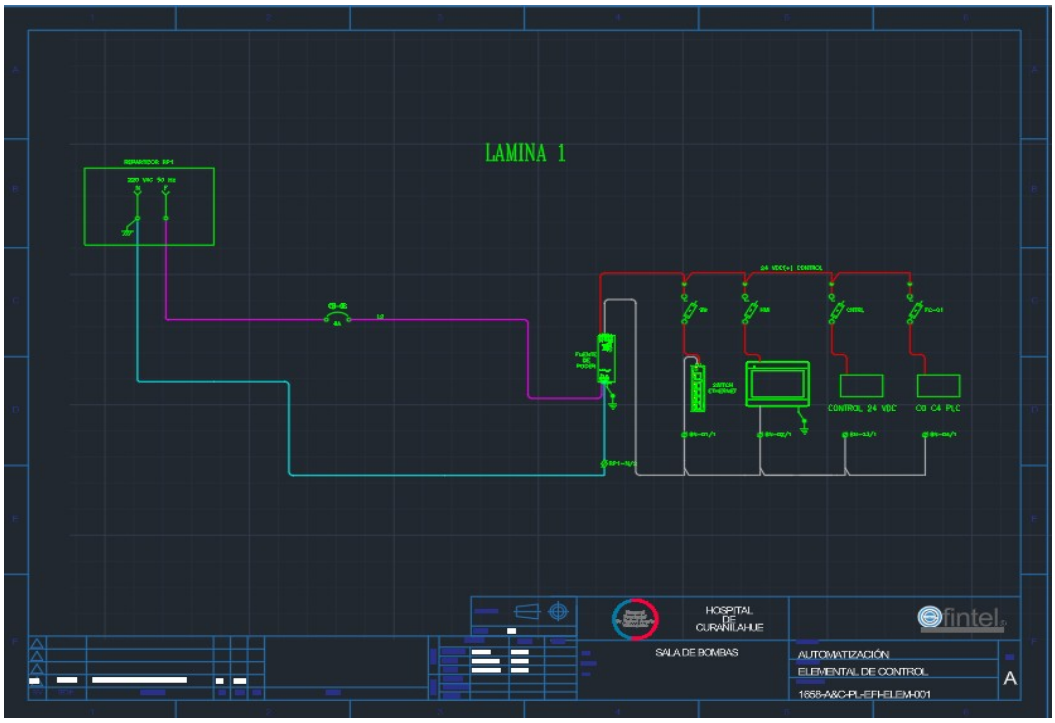


Diagrama de conexionado de alimentación de control 24 VDC.

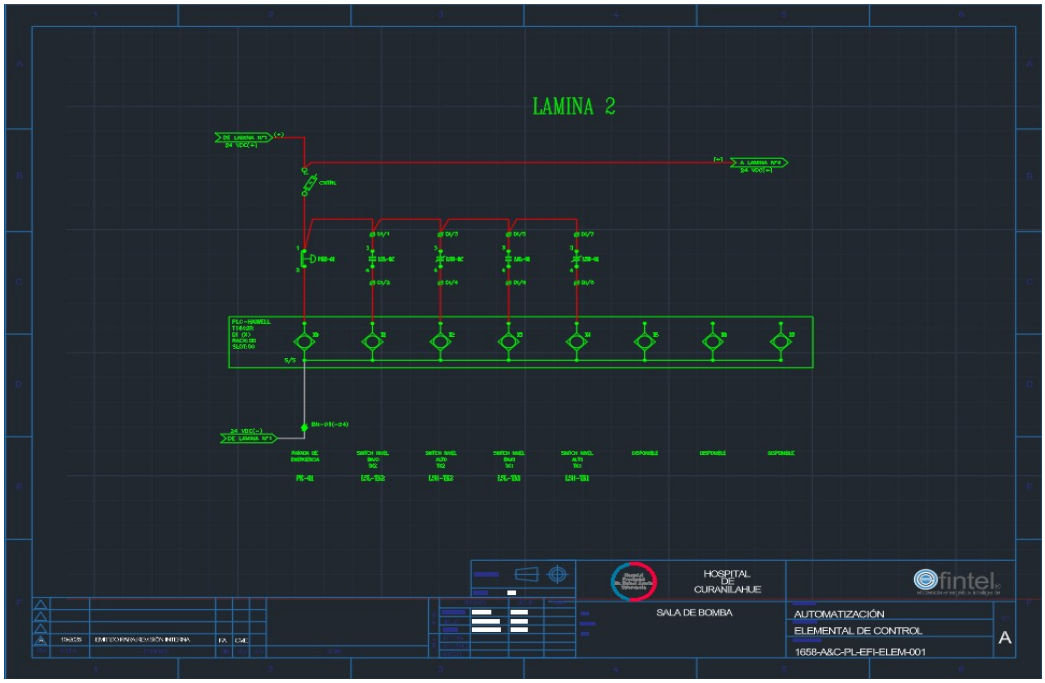


Diagrama de conexionado de las entradas discretas del PLC.

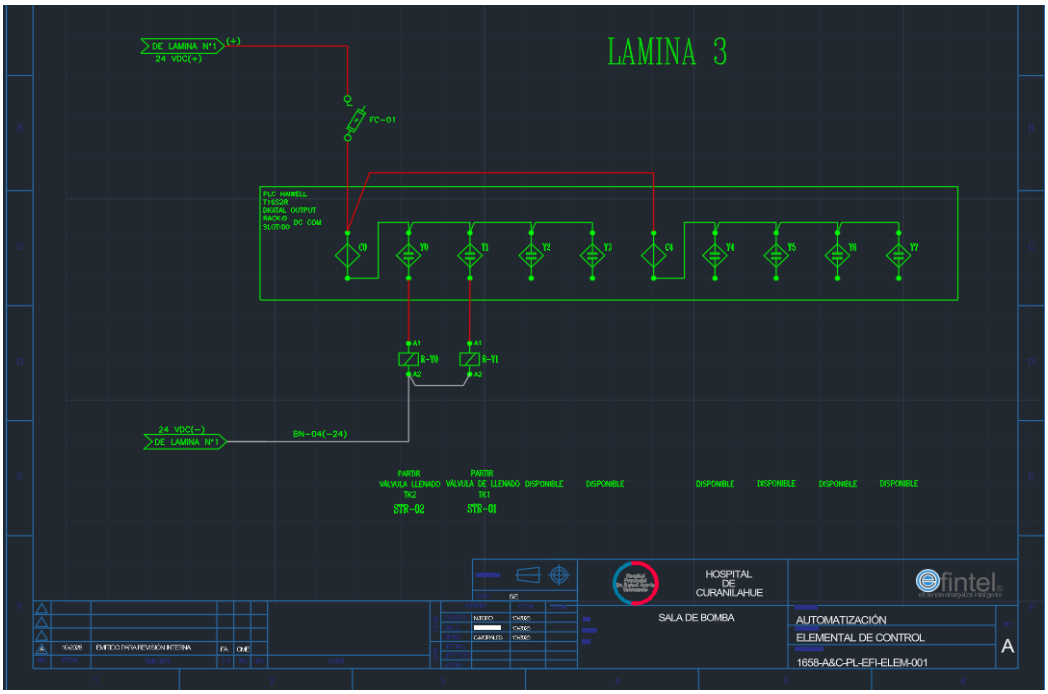


Diagrama de conexionado de las salidas discretas del PLC.

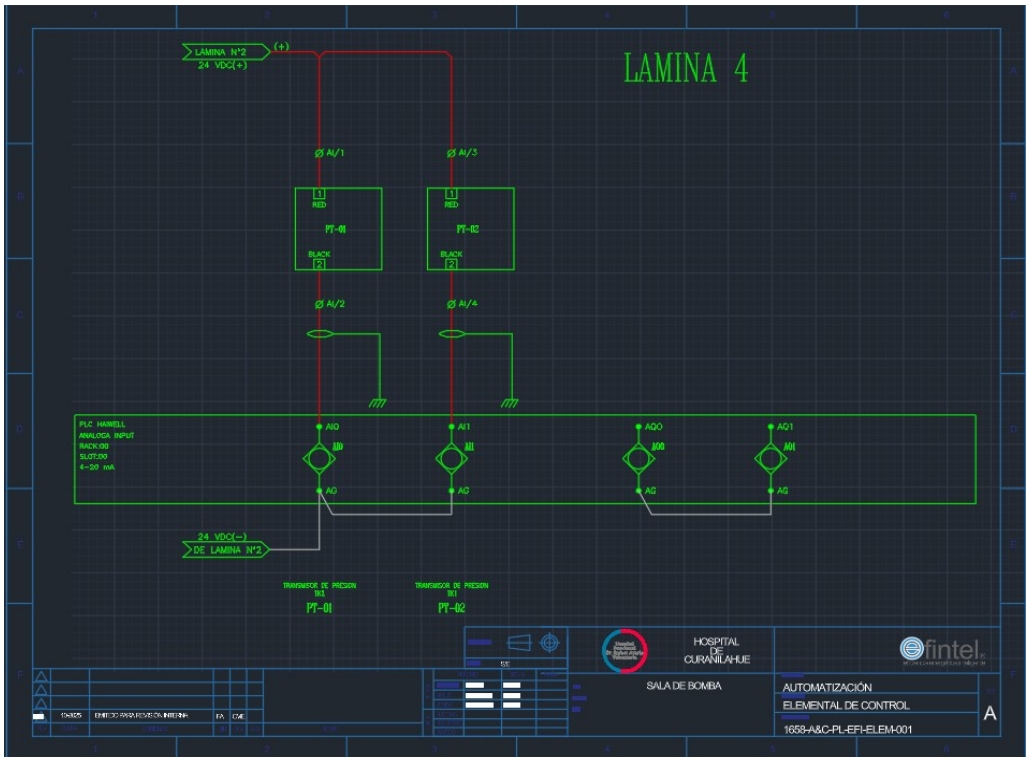
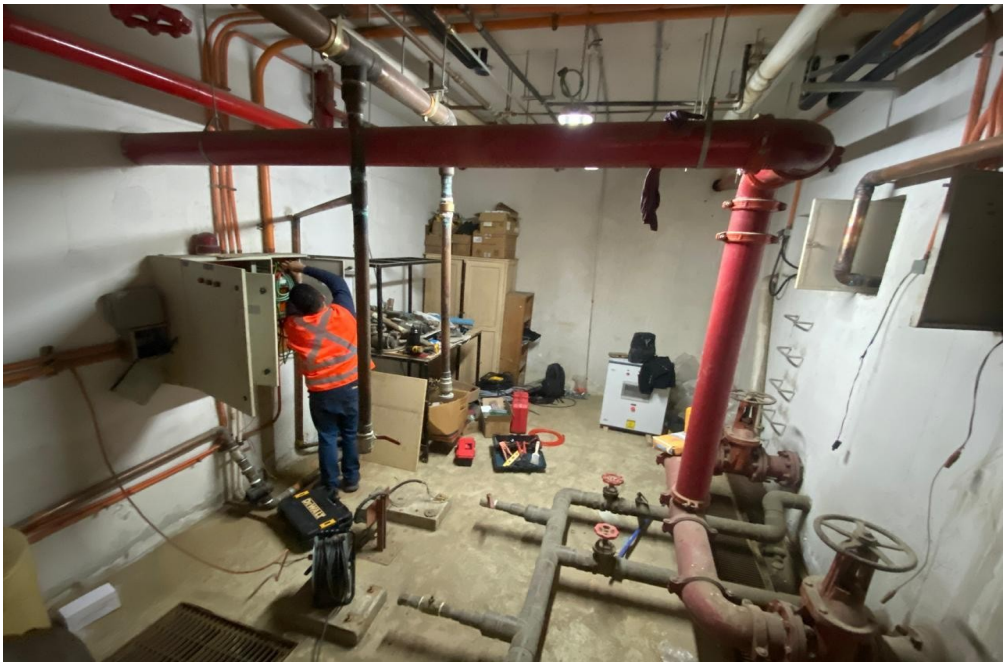


Diagrama de conexionado del módulo de entradas analógicas S04XA.

Anexo D – Fotos proyecto



Carga de la HMI desde un notebook mediante cable de red UTP, a través de una conexión Ethernet.



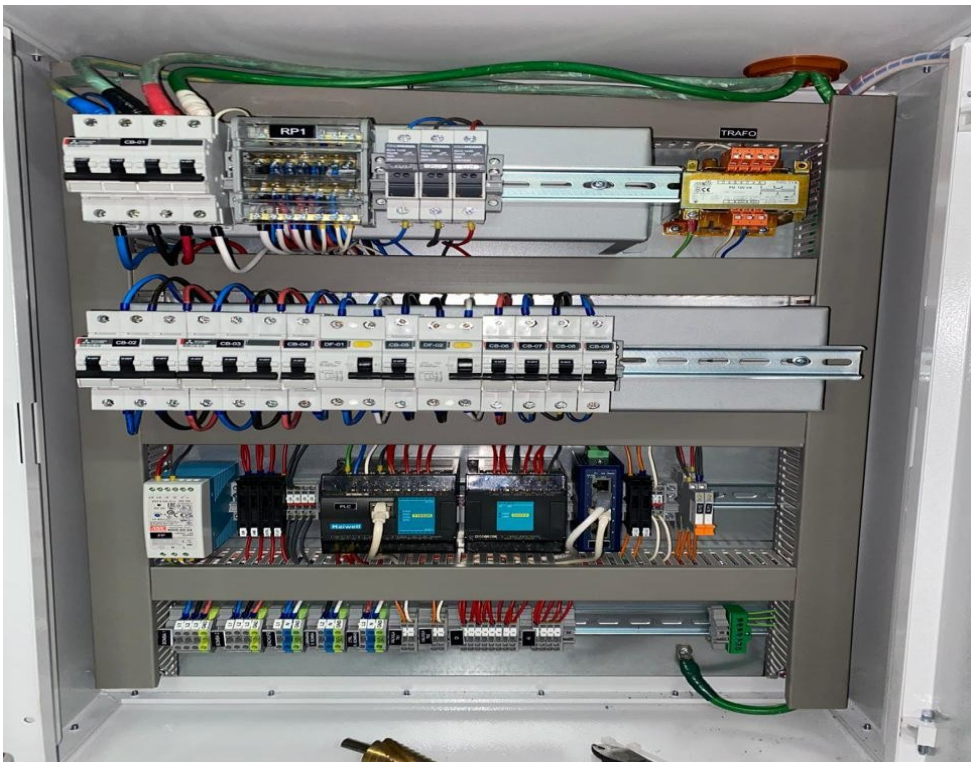
Desmontaje del antiguo gabinete de fuerza y control en la Sala de reservas.



Canalización EMT de ¾” para la instrumentación de campo y la iluminación de los estanques.



Canalización EMT de ¾” para la instrumentación de campo hacia el gabinete de control.



Interior del gabinete de fuerza y control.



Tapa interior del gabinete de fuerza y control.