

**UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA
SEDE CONCEPCIÓN – REY BALDUINO DE BÉLGICA.**



**UNIVERSIDAD TECNICA
FEDERICO SANTA MARIA**

**Implementación de lazos de control PID,
comunicación PLC siemens S7-1500 con VDF y desarrollo
de una HMI web en una planta didáctica de fluidos .**

*Memoria de titulación para optar al Título de Ingeniero de Ejecución en Control e
Instrumentación Industrial.*

Autores:

Sacha Castillo
Cristhian Henríquez

Profesor guía:

Helmut Contreras



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
Implementación de lazos de control PID, comunicación PLC Siemens S7-1500 con VDF y desarrollo de una HMI Web en
Título del trabajo: una planta didáctica de fluidos

Nombre del candidato(a): Sacha Castillo

Carrera / Grado: Ingeniería en instrumentación y control industrial

Campus: Sede concepción

Departamento: Informática

2.- VALIDACIÓN DEL PROFESOR GUÍA/DIRECTOR DE TESIS

Yo, Helmut Alexis Contreras Novoa, 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: Helmut Alexis Contreras Novoa

Fecha: 29 - 12 - 2025

Firma: 

Estudiante o Candidato(a):

29 - 12 - 2025

Fecha:

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.

Figura 0.1: Constancia Sacha Castillo



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
Implementación de lazos de control PID, comunicación PLC Siemens S7-1500 con VDF y desarrollo de una HMI Web en una Plan
Título del trabajo: didáctica de fluidos

Nombre del candidato(a): Cristhian Henríquez
Ingeniería en instrumentación y control industrial

Carrera / Grado: _____

Campus: Sede Concepción Departamento: Informática

2.- VALIDACIÓN DEL PROFESOR GUÍA/DIRECTOR DE TESIS

Yo, Helmut Alexis Contreras Novoa, 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: Helmut Alexis Contreras Novoa
Fecha: 29 - 12 - 2025 Firma: 

Estudiante o Candidato(a):
Fecha: 29 - 12 - 2025 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.

Figura 0.2: Constancia Cristhian Henríquez

Índice

Resumen	7
Agradecimientos	8
Agradecimientos Personales	9
Introducción	11
Objetivo General	13
Objetivos Específicos	14
Alcances del Proyecto	15
Restricciones	16
Siglas	17
1. Capítulo 1: Marco teórico y estado del arte	18
1.1. Introducción a la Automatización en Sistemas de Bombeo	18
1.1.1. Contexto Industrial de sistemas Controlados	18
1.1.2. Planta didáctica de fluidos	18
1.1.3. Consideraciones del proceso	18
1.2. Tecnologías en la Automatización de Bombeo	19
1.2.1. Controladores Lógicos Programables (PLC)	19
1.2.2. Tipos de controladores Lógicos Programables (PLC)	19
1.3. Equipamiento y componentes del sistema	20
1.3.1. PLC siemens S7-1500	20
1.3.2. Interfaz de Comunicacion PROFINET	25
1.3.3. Variador de Frecuencia:	26
1.3.4. Transmisor de flujo empleado	27
1.3.5. Transmisor de presión empleado	28
1.3.6. Bomba Hidraulica	29
1.4. Simulación de Procesos con Factory IO	30
1.4.1. Descripción de Factory IO	30
1.4.2. Integración con PLC vía Modbus/OPC	30
1.5. Tecnologías de monitoreo a distancia en la industria actual	30
1.5.1. Sistemas HMI disponibles en Siemens	30
1.5.2. Opciones de la competencia	30
1.6. Tecnologías Web para HMI	31
1.6.1. HTML	31
1.6.2. HTML5	31
1.6.3. CSS	32
1.6.4. JavaScript	32

1.6.5.	HTTP y HTTPS	32
1.6.6.	Resumen tecnologías web	33
2.	Capítulo 2: Diseño e implementación física de control	34
2.1.	Normativas y estándares aplicados al sistema	34
2.1.1.	Normas eléctricas y de seguridad industrial	34
2.1.2.	Normativas para bomba centrífuga CP 158	34
2.1.3.	Normativas para el SITRANS FM MAG 6000	34
2.1.4.	Normativas aplicables al PLC y comunicaciones industriales	35
2.1.5.	Normas de seguridad funcional y puesta a tierra	35
2.2.	Comunicación entre equipos	36
2.2.1.	PLC S7-1500 y Sinamics G120	36
2.2.2.	PLC S7-1500 y Sensores	37
2.2.3.	PLC S7-1500 y Válvulas actuadoras	38
2.2.4.	PLC S7-1500 y HMI web	38
2.3.	Programa de control y Parámetros PID	39
2.3.1.	Descripción general del sistema (Nivel)	39
2.3.2.	Programación TIA Portal de Nivel	39
2.3.3.	Parametrización PID compact	40
2.3.4.	Modo de operación Nivel	41
2.3.5.	Resultados y comportamiento del sistema de Nivel	42
2.3.6.	Programación TIA Portal de Flujo y Presión	42
2.3.7.	Bloque SinaSpeed	43
2.3.8.	Asignación de entradas y salidas del PLC (NIVEL)	44
3.	Capítulo 3: Diseño e Implementación de HMI WEB	45
3.1.	Diseño e Integración de la HMI Web	45
3.1.1.	Arquitectura general de la interfaz	46
3.1.2.	HMI Web del lazo de nivel	47
3.1.3.	Diagrama de lazo de control de flujo	49
3.1.4.	Lectura y actualización de variables en la HMI	49
3.1.5.	HMI Web del lazo de presión	51
3.1.6.	HMI Web del lazo de flujo	53
3.1.7.	Integración de router inalámbrico para acceso remoto	55
3.2.	Pruebas y Validación del sistema	61
3.2.1.	Validación de la comunicación entre equipos	61
3.2.2.	Respuesta dinámica del lazo de nivel	63
3.2.3.	Respuesta dinámica del lazo de flujo	64
3.3.	Conclusión	66
3.4.	Recomendaciones	66

Índice de figuras

0.1. Constancia Sacha Castillo	1
0.2. Constancia Cristhian Henríquez	2
Restricciones del Sistema	16
1.0. PLC S7-1500	20
1.1. Fuente de alimentación	21
1.2. CPU 1512C-1PN	22
1.3. Módulo analógico	23
1.4. Módulo digital	24
1.5. Puertos PROFINET	25
1.6. SINAMICS G120	26
1.7. SITRANS FM MAG 6000	27
1.8. SITRANS P320	28
1.9. PUMP CP 158	29
2.0. conexión PLC-VDF	36
2.1. Telegrama estándar 1	37
2.2. Conexión de sensores a modulo analógico	38
2.3. Partir/parar Nvl	39
2.4. Programa de funcionamiento Nvl	40
2.5. PID compact Nvl	40
2.6. Bloque de escalado RPM	42
2.7. Bloque SinaSpeed	43
3.0. HMI Web Nivel	48
3.1. Diagrama lazo físico	49
3.2. HMI Web Presión	52
3.3. HMI Web Flujo	54
3.4. Router Utilizado	56
3.5. Configuración del Router	57
3.6. Configuración del PLC a Router	58

Índice de cuadros

1.1.	Tabla de especificaciones del Variador de frecuencia	26
1.2.	Tabla de especificaciones del transmisor de flujo	27
1.3.	Tabla de especificaciones del transmisor de presión	28
1.4.	Tabla de especificaciones de la Bomba	29
2.1.	Normativas principales aplicadas a los componentes del sistema	35
2.2.	Parámetros PID Nivel	41
2.3.	Asignación de Entradas y Salidas del PLC para el lazo de nivel.	44

Resumen

El presente proyecto consiste en la implementación de lazos de control PID en una planta didáctica de bombeo de agua, con la finalidad de regular variables críticas como presión, nivel y flujo. Para ello se empleará un PLC Siemens S7-1500 en comunicación directa con un variador de frecuencia (VFD), permitiendo un control dinámico y eficiente del motor de bombeo.

Paralelamente, se desarrollará una HMI web que permitirá la supervisión y operación del sistema de forma remota, mostrando en tiempo real las variables del proceso. Asimismo por limitaciones físicas, será posible la implementación física de los lazos de control de flujo y presión, pero mediante el software de simulación Factory I/O, se implementará la simulación del control de nivel, lo que complementará la parte física y permitirá validar estrategias de regulación sin las limitaciones de la planta real.

Agradecimientos

Este proyecto de titulación representa el cierre de una etapa trascendental en nuestras vidas, un camino que no habríamos podido recorrer solos. Por ello, dedicamos estas líneas a quienes hicieron posible este logro.

En primer lugar, agradecemos profundamente a nuestras familias, quienes han sido el pilar fundamental e inquebrantable durante todo este proceso formativo. Gracias a nuestros padres, por inculcarnos el valor del esfuerzo, la honestidad y la perseverancia; gracias por su apoyo incondicional, por su paciencia infinita durante las largas noches de estudio y los fines de semana dedicados a este proyecto. Gracias por creer siempre en nuestra capacidad para alcanzar esta meta, incluso en los momentos de mayor dificultad. Este logro lleva su nombre y es, ante todo, un tributo a su sacrificio y amor.

A la Universidad Técnica Federico Santa María, nuestra alma máter, por ser el espacio donde nos formamos profesional y personalmente. Agradecemos a esta casa de estudios por brindarnos las herramientas de excelencia, el conocimiento riguroso y los valores éticos que hoy nos permiten convertirnos con orgullo en Ingenieros de Ejecución en Control e Instrumentación Industrial. Llevar el sello "sansano.^{es} un honor que nos compromete a contribuir al desarrollo tecnológico con responsabilidad y dedicación.

Queremos extender un agradecimiento especial y sincero a nuestro profesor guía, Sr. Helmut Contreras, por su orientación constante, su excelente disposición y sus valiosos consejos técnicos durante el desarrollo de esta memoria. Su vasta experiencia y visión práctica fueron claves para llevar a buen puerto la implementación de los lazos de control y la integración tecnológica que este proyecto requería. Gracias por guiarnos no solo en lo académico, sino también por compartir su criterio profesional con nosotros.

Finalmente, agradecemos también al cuerpo docente de la sede Concepción, cuya exigencia y dedicación nos impulsaron a superar nuestros propios límites y a buscar siempre la excelencia profesional. Asimismo, agradecemos a nuestros compañeros y amigos de generación, con quienes compartimos aulas, desafíos y aprendizajes que perdurarán más allá de la vida universitaria.

Agradecimientos Personales

Autor: Sacha Castillo

En primer lugar, quiero agradecer a **Dios**, por darme la vida, la sabiduría y la fortaleza necesaria para mantenerme firme en este camino y permitirme alcanzar este importante logro personal y profesional.

A mi **familia**, que ha sido mi motor y refugio incondicional. A mi padre y mi madre, gracias por su infinito amor, por cada sacrificio realizado para darme educación y por enseñarme que con esfuerzo y honestidad todo es posible. A mis hermanos, gracias por su apoyo constante, por estar siempre presentes y por creer en mí en cada paso de este desafío. Este título también es de ustedes.

Un reconocimiento muy especial es para mi **grupo de amigos**, esa amistad que se forjó en las aulas y pasillos de la universidad a lo largo de todos estos años. Aunque esta aventura comenzó con ocho integrantes y hoy cerramos el ciclo siendo seis, cada uno ha sido parte fundamental de esta historia. Gracias por las risas, el estudio compartido y por hacer que el peso de la carrera fuera más ligero gracias a su amistad.

Finalmente, quiero expresar mi gratitud a mi compañero y amigo, **Cristhian Henríquez**. Gracias por el compromiso, el trabajo en equipo y la perseverancia que demostraste durante todo este proyecto. Juntos logramos superar las dificultades técnicas y académicas, y valoro enormemente el apoyo mutuo que nos brindamos para llegar a la meta.

Atentamente,
Sacha Castillo

Autor: Cristhian Henríquez

A **Dios**, por ser el arquitecto de mi camino y colocar en él a las personas indicadas. Gracias por darme la fe necesaria para disipar la incertidumbre en los momentos difíciles y por bendecirme con desafíos que impulsaron mi crecimiento personal y profesional.

A mis **docentes**, quienes clase a clase no solo forjaron mis habilidades técnicas, sino también las humanas. Me siento orgulloso de haber aprendido de su experiencia y vocación.

A mis **amigos y compañeros**, por la lealtad y el compromiso demostrados. Las experiencias compartidas nos han convertido en esa familia que uno elige, donde el bienestar de uno es la prioridad de todos.

A mi **familia**, cimiento de lo que soy. Gracias por su inagotable paciencia, por su apoyo incondicional, por inculcarme los valores y la resiliencia que hoy me sostienen. Ustedes son mi mayor inspiración para seguir superándome.

De manera especial a mi compañera y amiga, **Sacha Castillo**. Gracias por tu motivación y entrega en este proyecto. Tu inteligencia, perfeccionismo y resiliencia fueron el complemento perfecto que me permitió superar cada adversidad académica. Este logro también lleva tu nombre.

Atentamente,
Cristhian Henríquez

Introducción

La automatización industrial se ha convertido en un pilar fundamental para optimizar procesos, aumentar la eficiencia energética y garantizar la confiabilidad en los sistemas de producción. En este contexto, el control automático mediante lazos PID (Proporcional, Integral y Derivativo) se consolida como una de las herramientas más utilizadas, dado que permite regular variables críticas como temperatura, nivel y flujo con gran precisión y estabilidad.

El presente proyecto tiene como objetivo la implementación de lazos de control PID en una planta didáctica de bombeo de agua, integrando la instrumentación necesaria con un PLC Siemens S7-1500, variadores de frecuencia (VFD) y el desarrollo de una interfaz HMI web. De esta forma, se busca replicar de manera académica las condiciones reales de un proceso industrial de manejo de fluidos, fortaleciendo tanto la comprensión teórica como la aplicación práctica de los conceptos de control automático y comunicación industrial.

La planta de bombeo seleccionada dispone de dos lazos de control principales implementados en el sistema físico:

- **Control de flujo:** encargado de mantener un caudal constante en la red hidráulica, garantizando un suministro estable y continuo hacia el proceso o los depósitos. Este lazo actúa sobre el variador de frecuencia de la bomba correspondiente, ajustando su velocidad de giro en función de la señal medida por el transmisor de caudal SITRANS F M MAG 6000.
- **Control de presión:** responsable de asegurar la presión adecuada dentro de la línea de impulsión, compensando las pérdidas de carga o variaciones en la demanda del sistema. Para ello, se utiliza el transmisor de presión SITRANS P320, cuya señal analógica es procesada por el PLC Siemens S7-1500 y regulada mediante un variador de frecuencia SINAMICS G120 asociado a la bomba de presión.

De forma complementaria, empleando el software de simulación Factory I/O, se implementa de manera virtual un tercer lazo de control:

- **Control de nivel:** Destinado a mantener el volumen adecuado de líquido en los tanques de almacenamiento o depósitos. Este lazo reproduce el comportamiento del sistema hidráulico real, permitiendo ajustar el nivel dentro de los límites de seguridad y evitando condiciones de desborde o vaciado. La simulación permite complementar la implementación física de la planta didáctica, ofreciendo un entorno flexible para la experimentación, la validación de parámetros PID y el análisis de la respuesta dinámica del sistema, sin las limitaciones que impone el equipamiento real.

La integración de los lazos de control con el PLC S7-1500 y su comunicación con los variadores de frecuencia posibilita la implementación de estrategias de control avanzadas, donde el accionamiento de las bombas se ajusta dinámicamente en función de las condiciones del proceso. A su vez, la incorporación de una HMI accesible vía web proporciona una plataforma interactiva para la visualización en tiempo real, la supervisión y la operación remota de la planta, alineándose con las tendencias de la Industria 4.0 y la digitalización de procesos.

Finalmente, este trabajo no solo busca validar el desempeño de los lazos de control en condiciones reales y simuladas, sino también demostrar la importancia de la integración entre hardware, software e instrumentación en el ámbito de la automatización industrial. En consecuencia, la experiencia obtenida sienta las bases para futuros desarrollos más complejos, aplicables en entornos industriales de mayor escala.

Objetivo General

Diseñar, implementar y validar un sistema de automatización para el control de procesos en una planta didáctica de fluidos, integrando un controlador lógico programable Siemens S7-1500 con instrumentación de campo y actuadores tanto físicos como simulados. El proyecto busca establecer la regulación estable de las variables de presión, flujo y nivel mediante algoritmos PID, visualizados y comandados a través de una HMI Web desarrollada en WinCC Unified con acceso vía red inalámbrica, con el objetivo final de evaluar el desempeño dinámico del sistema y optimizar la interacción entre los componentes de control y las tecnologías de supervisión remota.

Objetivos Específicos

- I. Analizar las variables críticas de la planta didáctica de fluidos (nivel, flujo y presión) y definir la estrategia de control adecuada para cada lazo.
- II. Implementar físicamente dos lazos de control simple en la planta didáctica (flujo y presión), estableciendo la comunicación entre el PLC Siemens S7-1500 y un variador de frecuencia para cada control.
- III. Desarrollar en entorno simulado (Factory I/O) el lazo de control de nivel, replicando la lógica de automatización.
- IV. Configurar la comunicación entre el PLC y los VFD mediante protocolos industriales, asegurando confiabilidad en la transmisión de consignas y retroalimentación.
- V. Diseñar y programar una HMI web que permita la supervisión, visualización de variables y el control de los accionadores.

Alcances del Proyecto

I. Implementación de lazos de control PID en la planta de bombeo.

Los lazos de control PID permiten regular de manera automática variables críticas como la presión, el nivel y el flujo dentro de la planta didáctica de bombeo de agua. A través del ajuste de parámetros de control, se logra mantener la estabilidad del sistema, compensar perturbaciones y garantizar un funcionamiento eficiente del proceso. Esta estrategia de control asegura un suministro confiable y continuo, reduciendo pérdidas energéticas y mejorando la precisión en la operación.

II. Comunicación del PLC Siemens S7-1500 con el variador de frecuencia (VFD).

La comunicación entre el PLC y el VFD posibilita el control preciso de la velocidad de los motores de bombeo, adaptándose en tiempo real a las necesidades del proceso. Esta integración permite que las órdenes generadas por los lazos PID se traduzcan en ajustes de velocidad en el motor, logrando un sistema más flexible, eficiente y seguro. Con ello, se optimiza el consumo energético y se incrementa la vida útil de los equipos.

III. Desarrollo de la HMI web para supervisión y control.

La interfaz HMI web brinda a los operadores una plataforma intuitiva y accesible para monitorear el estado de la planta, visualizar tendencias de las variables y operar el sistema de forma remota. Esta tecnología facilita la supervisión en tiempo real y la toma de decisiones rápidas ante cualquier contingencia. Además, se alinea con los principios de la Industria 4.0, al integrar la conectividad y digitalización en el ámbito del control automático.

IV. Integración con simulación en Factory I/O.

Complementariamente, se implementan de manera virtual el lazo de control de nivel en Factory I/O, lo que permite analizar el comportamiento dinámico del sistema sin las limitaciones físicas de la planta real. Esta simulación ofrece un entorno seguro y flexible para la experimentación, ajuste de parámetros y validación de estrategias de control, enriqueciendo el proceso de aprendizaje y reduciendo riesgos en la operación práctica.

Restricciones

I. Sistemas establecidos:

- **PLC Siemens S7-1512C-1PN:** Controlador lógico programable ideal para automatización de tamaño medio, con entradas y salidas digitales, comunicación Profinet y ampliaciones modulares.
- **Planta didáctica:** Su diseño físico está previamente definido, lo que limita la posibilidad de modificar las condiciones de operación.
- **Variadores de frecuencia SINAMICS G120 :** Solo admite comunicación mediante protocolos compatibles (Profinet/Profibus), restringiendo la integración con otros dispositivos que no soporten estos estándares.
- **Instrumentación instalada:** Los sensores de presión y flujo disponibles cuentan con rangos y precisiones determinadas, restringiendo la implementación de lazos de control fuera de esos parámetros.

II. HMI web y simulación en Factory I/O:

- **HMI web:** La interfaz solo puede desarrollarse con las herramientas compatibles con el PLC (TIA Portal / WinCC Unified), lo que restringe el uso de plataformas externas.
- **Simulación Factory I/O:** Los modelos de proceso disponibles en la librería limitan el realismo del sistema. No es posible replicar todas las condiciones físicas de la planta, por lo que algunos lazos se implementarán solo en forma virtual.



Figura:Restricciones del Sistema

Siglas

- HMI - Interfaz Hombre Máquina.
- PLC - Programador lógico Programable
- OPC UA - Arquitectura unificada de comunicaciones de plataforma abierta
- SCADA - Control de Supervisión y Adquisición de Datos
- API - Interfaz de programación de aplicaciones
- IT - Tecnología de Información
- OT- Tecnología de operación
- OSI - Modelo de Interconexión de Sistemas Abiertos
- HTML - Lenguaje de marcado de hipertexto
- HTTP - Protocolo de Transferencia de hipertexto
- CSS - Hojas de Estilo en Cascada
- SVG - Gráficos vectoriales ampliables
- JS - JavaScript
- M2M - Maquina a maquina
- PC - Computadora personal
- DCS - Sistema de control distribuido
- E/S - Entradas y Salidas
- IP - Protocolo de Internet
- USB - Bus serial universal
- PID - Controlador Proporcional-Integral-Derivativo
- RPM - Revoluciones por
- PT-101 - Transmisor de presión
- FT-100 - Transmisor de flujo
- FIC-100 - Controlador de flujo
- PIC-101 - Controlador de presión
- SY-100 - Controladoe de velocidad/frecuencia

1. Capítulo 1: Marco teórico y estado del arte

1.1. Introducción a la Automatización en Sistemas de Bombeo

1.1.1. Contexto Industrial de sistemas Controlados

La automatización en sistemas de bombeo se ha convertido en un factor esencial para garantizar la eficiencia, la seguridad y la continuidad operativa en aplicaciones industriales y de servicios. El uso de PLC, variadores de frecuencia (VFD) y sistemas de supervisión HMI ha permitido la implementación de lazos de control avanzados para variables como nivel, presión y flujo.

El desarrollo de interfaces web integradas en los controladores modernos ha ampliado las posibilidades de supervisión, permitiendo acceder a los procesos de manera remota, segura y multiplataforma, sin necesidad de software propietario adicional.

1.1.2. Planta didáctica de fluidos

Para el desarrollo del proyecto, se realiza en primera instancia el levantamiento de la planta de manera presencial, verificando el estado actual de cada componente. En cuanto a la instalación, se usará solo la infraestructura necesaria para dos lazos físicos de control.

El proceso consiste en la circulación de flujo en un solo tanque de (n) Litros, con una bomba hidráulica manejada con un Variador de frecuencia y un controlador lógico programable de la familia S7 1500 de Siemens, el flujo se medirá a través de un sensor (sitrans FM MAG 6000), instalado en la tubería de vaciado o llenado del estanque, se podrán agregar perturbaciones al sistema para ver cómo reacciona y es monitoreado a través de la hmi web.

VARIABLES DEL PROCESO

- Nivel: Altura que alcanza la superficie del fluido dentro del recipiente.
- Flujo: Cantidad o volumen del fluido que circula por unidad de área.
- Presión: Fuerza ejercida por el fluido por unidad de área.

1.1.3. Consideraciones del proceso

- Bajo nivel: Esta condición es de protección de la bomba ya que esta no debe estar en marcha si no tiene alimentación hidráulica, por tanto se ubica un LSL (level Switch low) sobre la admisión de líquido a la bomba con el fin de que no ingrese aire a la misma y así se eviten problemas de cavitación.
- Velocidades de funcionamiento: La Bomba está fabricada para trabajar a un máximo de 90 L/min (50 Hz) y un mínimo de 10 L/min. Operar una bomba muy por debajo de su velocidad de diseño puede generar ineficiencias, mayor calor y mayor desperdicio de energía e incluso dañar el equipo.
- Ubicación de sensor: Se debe instalar en tramos rectos (5–10 diámetros de tubería antes y 3–5 después) para evitar turbulencias.

- **Ruido y Cable Ethernet:** Usar un Cable blindado y mantener separación mínima de 20–30 cm respecto a cables de potencia (especialmente los que van del VDF al motor).

1.2. Tecnologías en la Automatización de Bombeo

1.2.1. Controladores Lógicos Programables (PLC)

El PLC es un dispositivo de control computarizado que cumple la función de realizar procesos automatizados en la industria. Se sustenta en la ingeniería automática que es la fuente de alimentación de todo el sistema. Está elaborado para ejecutar las entradas y salidas E/S de manera rápida y segura.

1.2.2. Tipos de controladores Lógicos Programables (PLC)

- **PLC nano:** Pueden realizar entradas y salidas y módulos especiales dentro del sistema. Se caracteriza por ser pequeño. Estos instrumentos han avanzado, pero mantienen sus opciones sencillas de programación, al tiempo que han adoptado funcionalidades como el control de procesos o las operaciones matemáticas.
- **PLC modular:** Se reconocen en el mercado como autómatas universales para pequeñas y medianas aplicaciones. brindan una CPU de alto rendimiento, alta velocidad y una diversidad de opciones de comunicación. En esta categoría existen los micros PLC utilizados cuando se requiere de grandes cantidades de entradas y salidas y los PLC de grandes prestaciones necesarias para miles de entradas y salidas.
- **PLC compacto:** Se trata de un aparato de una sola unidad y que no requiere de módulos adicionales de entradas, salidas o fuente de alimentación. Trabajan con variados módulos especiales. Tienen incorporados la fuente de alimentación y el CPU.

1.3. Equipamiento y componentes del sistema

Los PLC Siemens están diseñados para atender las solicitudes que requieran las industrias en procesos de automatización. Con estos controladores el usuario obtendrá seguridad, tecnología, diagnósticos y resolución de problemas.

1.3.1. PLC siemens S7-1500

El SIMATIC S7-1500 (Vease figura 1.0) es un sistema de control modular que consta de un máximo de 32 bloques incluyendo fuente de alimentación y CPU. A continuación se describen los componentes principales del sistema a implementar, considerando los requerimientos de la planta didáctica de fluidos y realizando un estudio técnico basado en manuales disponibles de fabricantes.



Figura 1.0: PLC S7-1500

■ Requerimientos del PLC:

- Firmware Versión 2.7 o superior
- STEP 7 y WinCC a partir de la versión V17 una comunicación PG/PC y HMI.

■ **Fuente de alimentación REF: 6EP1336-3BA10.**

Fuente de alimentación de carga monofásica SITOP PSU8200 , diseñada para el PLC S7-1500, cuenta con selección de rango automático de la tensión de entrada. Esta fuente actúa como el **corazón eléctrico del sistema de control**, asegurando que todos los equipos reciban la energía necesaria de forma estable para un funcionamiento seguro y continuo.

- **Tensión de salida de 24 V dc limitada a un máximo de 28 V dc.**
- **Tensión de entrada nominal de 120/230 V ac, 50/60 Hz**
- **Potencia 480k**
- **Corriente de salida 20A**

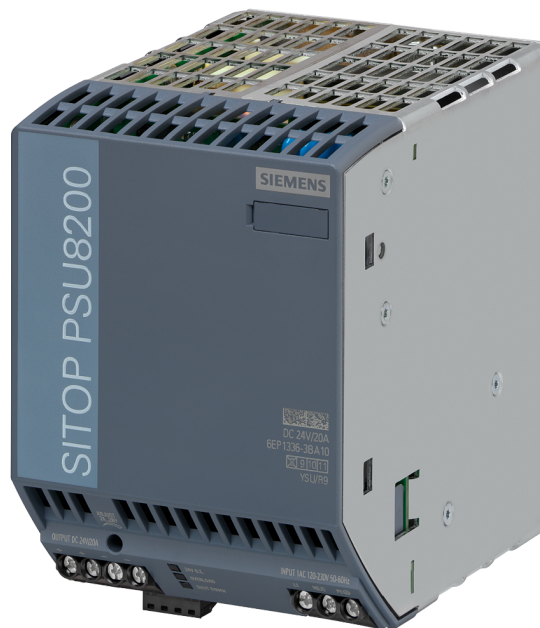


Figura 1.1: Fuente de alimentación

■ **CPU 1512C-1PN:** REF: 6ES7512-1CK01-0AB0

La CPU 1512C-1 PN se compone de un modulo CPU, así como de la periferia analógica integrada (X10) y la periferia digital integrada (X11 y X12). Para la configuración en el TIA Portal, la CPU compacta ocupa un slot común (slot 1). En resumen consta con 5 entradas de la periferia analógica integrada, 2 salidas de la periferia analógica integrada, en la periferia digital tenemos integrada a 32 entradas digitales rápidas para señales hasta máx. 100 kHz. De las 32 salidas estándar, hay 8 salidas que también pueden utilizarse como salidas rápidas para funciones tecnológicas. Las salidas y entradas digitales tienen una tensión nominal de salida de 24 V DC.



Figura 1.2: CPU 1512C-1PN

■ Módulo de entradas y salidas analógicas integradas

- Periferia analógica integrada (X10). Tiene 5 entradas analógicas 4 para U/I, 1 para R/RTD. Mientras que en las salidas solo cuenta con 2.
 - **Resolución: 16 bits incl. signo**
 - **Tipos de medición integrados**



Figura 1.3: Módulo analógico

■ Módulo de entradas y salidas digitales integradas

- Tienen 32 canales de entradas digitales, al igual que las entradas cuenta con 32 salidas digitales, su tipo de salida es de transistor.
 - **Tensión de entrada/salida: 24V DC**
 - **Intensidad de salida: 0.5 A**



Figura 1.4: Módulo digital

1.3.2. Interfaz de Comunicacion PROFINET

Interfaz PROFINET X1 con switch de 2 puertos (X1 P1 R y X1 P2 R) La asignación corresponde al estándar Ethernet para conectores RJ45. Medio físico y lógico que permite la comunicación en tiempo real entre equipos de automatización industrial, como PLCs, pantallas HMI, y variadores.

- Cuando Autonegotiation está desactivada, el conector hembra RJ45 tiene la asignación de switch (MDI-X).
- Cuando Autonegotiation está activada, Autocrossing queda activo y el conector hembra RJ45 tiene la asignación de equipo terminal (MDI) o switch (MDI-X).
- La interfaz PROFINET propiamente dicha tiene una dirección MAC, y cada uno de los dos puertos PROFINET tiene una dirección MAC propia, de modo que para la CPU 1512C-1 PN hay en total tres direcciones MAC.

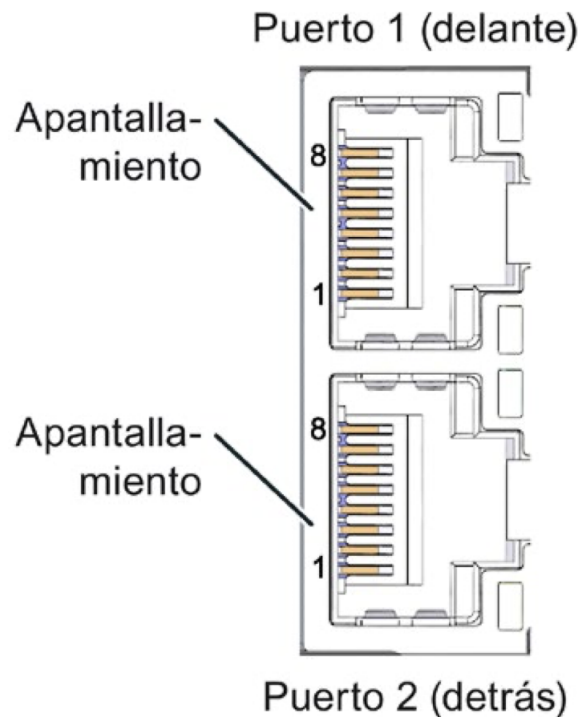


Figura 1.5: Puertos PROFINET

1.3.3. Variador de Frecuencia:

Los variadores, además de regular la velocidad de las bombas, ofrecen información energética y eléctrica que puede integrarse al PLC y mostrarse en la HMI web. En el caso de Siemens, los SINAMICS G120 permiten comunicación directa por Profinet, proporcionando datos de potencia, corriente, torque y alarmas. Siemens cuenta con un software para estos equipos, SINAMICS Startdrive, el cual es necesario para poder conectarlo a un PC.

- **VDF SINAMICS G120:** Se seleccionó este modelo debido a su compatibilidad nativa con PLC Siemens S7-1500 mediante PROFINET, su alta fiabilidad en la regulación de velocidad y su cumplimiento de las normas internacionales de seguridad eléctrica.

Fabricante	Siemens AG (Alemania)
Modelo	SINAMICS G120
Tipo	Variador de frecuencia modular
Tensión de alimentación	3 x 380-480 V AC $\pm 10\%$
Potencia de salida	Hasta 0,75kW (depende del modulo de potencia)
Corriente nominal	Aprox 2,5 A (para motor de 0,75 kW)
Frecuencia de alimentación	50/60 Hz
Rango de frecuencia de salida	0-650 Hz
Método de control	V/f, vectorial sin sensor, vectorial con encoder
Comunicación	PROFINET, PROFIBUS, Modbus TCP (según módulo CU)
Grado de protección	IP20 (IP55 opcional con gabinete)
Refrigeración	Ventilación forzada
Interfaz de usuario	Panel BOP-2 o IOP
Funciones integradas	Control PID, arranque suave, diagnóstico de fallas, limitadores de par
Normativas	IEC 61800, CE, UL, RoHS

Tabla 1.1: Tabla de especificaciones del Variador de frecuencia



Figura 1.6: SINAMICS G120

1.3.4. Transmisor de flujo empleado

Los transmisores evalúan las señales de los sensores electromagnéticos asociados, luego las convierten en señales estándar apropiadas (ej. de 4 a 20 mA) y realizan también la función de una unidad de alimentación que proporciona una corriente constante a las bobinas.

- **SITRANS FM MAG 6000:** El SITRANS FM MAG 6000 es un transmisor de caudal electromagnético de Siemens, diseñado para medición precisa de líquidos conductivos. Se emplea junto con un sensor de flujo de la serie MAG 1100/3100, y se seleccionó por su alta precisión, robustez y compatibilidad con entornos industriales húmedos (grado de protección IP67).

Parámetro	Descripción
Fabricante	Siemens (Fabricado en Francia)
Modelo	SITRANS FM MAG 6000
Tipo	Transmisor de flujo electromagnético
Alimentación eléctrica	230 V AC, 50/60 Hz
Rango de medición	0–10 m/s (dependiendo del diámetro del tubo sensor)
Precisión	$\pm 0,2\%$ del valor medido ± 1 mm/s
Salida analógica	4–20 mA (aislada galvánicamente)
Salidas digitales	Pulsos, frecuencia o estado (configurable)
Protocolos de comunicación	HART, PROFIBUS PA, Modbus RTU (según versión)
Temperatura de operación	–20 °C a +60 °C
Grado de protección	IP67
Montaje	En panel o pared
Material del gabinete	Aluminio fundido o acero inoxidable
Normativas	CE, ISO 9001, IEC 61010, NAMUR NE43

Tabla 1.2: Tabla de especificaciones del transmisor de flujo



Figura 1.7: SITRANS FM MAG 6000

1.3.5. Transmisor de presión empleado

- **SITRANS P320:** Es un transmisor de presión inteligente fabricado por Siemens, diseñado para la medición precisa y confiable de presión relativa, absoluta o diferencial en aplicaciones industriales. Pertenece a la familia de transmisores SITRANS P, reconocidos por su robustez, exactitud y compatibilidad con sistemas de automatización modernos mediante protocolos analógicos o digitales.
 - **Funcionamiento:** El SITRANS P320 funciona a partir del efecto piezorresistivo: la presión del proceso se aplica sobre un diafragma sensor, el cual transmite la deformación a un puente de galgas extensométricas. Esta deformación se convierte en una señal eléctrica proporcional a la presión aplicada. El transmisor amplifica y linealiza internamente la señal, entregando una salida estandarizada de 4–20 mA proporcional al valor de presión medida. Opcionalmente, el equipo puede comunicarse mediante el protocolo HART para calibración y diagnóstico remoto.

Parámetro	Valor típico
Tipo de medición	Presión relativa o absoluta
Rango de medición	Según modelo, entre –1 bar hasta 400 bar
Señal de salida	4–20 mA, protocolo HART 7
Alimentación	10,5 a 45 VDC
Exactitud	±0,065 % del valor final de escala
Tiempo de respuesta	¡100 ms
Temperatura de operación	–40 °C a +85 °C
Material del diafragma	Acero inoxidable o Hastelloy C (según modelo)
Grado de protección	IP67 (montaje en campo)

Tabla 1.3: Tabla de especificaciones del transmisor de presión



Figura 1.8: SITRANS P320

1.3.6. Bomba Hidraulica

Es aquella máquina cuyo objetivo es convertir la energía en velocidad y posteriormente en energía a presión. Es decir, transforman la energía mecánica en energía hidráulica. De esta manera, puede mover el mayor volumen de líquido posible.

- **PUMP CP 158:** Bomba centrífuga de superficie, cuenta con las siguientes especificaciones.

Parámetro	Descripción
Fabricante	PEDROLLO (Italia)
Modelo	CP 158
Tipo	Bomba centrífuga de superficie
Potencia nominal	0,75kW (1HP)
Alimentación eléctrica	Trifásica
Tensión nominal	220-230 V (Triangulo) / 380-400 V (Estrella)
Corriente nominal	4,35 A (230 V)/ 2,5 A (400 V)
Frecuencia	50 Hz
Régimen de giro	2.900 rpm
Clase de aislamiento	F
Grado de protección	IPX4
Caudal (Q)	10-90 L/min
Altura manométrica (H)	Máx: 36 m / Min: 25 m / Nominal: 25-34 m
Temperatura máxima del líquido	90°C
Servicio	S1 (continuo)
Año de fabricación	01-13
Normativa	Cumple con la Directiva de Máquinas y Marcado CE

Tabla 1.4: Tabla de especificaciones de la Bomba



Figura 1.9: PUMP CP 158

1.4. Simulación de Procesos con Factory IO

1.4.1. Descripción de Factory IO

Es un software de simulación interactivo. Proporciona un entorno virtual donde los usuarios pueden diseñar y operar fábricas simuladas que emulan el comportamiento de un sistema de producción real.

1.4.2. Integración con PLC vía Modbus/OPC

■ Ventajas

- **Reduce la necesidad de equipos físicos costosos y elimina riesgos.**
- **Ofrece experiencia en entornos industriales simulados.**
- **Tiene un enfoque didáctico**
- **Los protocolos de comunicación que ofrece son los más utilizados en el mercado**

1.5. Tecnologías de monitoreo a distancia en la industria actual

En la actualidad existen diversos metodos para poder visualizar y manipular las variables de un proceso en tiempo real, una herramienta fundamental que cumple este rol es la HMI (Human-Machine Interface).

1.5.1. Sistemas HMI disponibles en Siemens

- **Web Server (PLC S7-1200 y 1500):** Siemens en sus modelos nuevos de PLC S7-1200 (G2) y S7-1500, integra un servidor en donde alojar paginas web, creadas por el usuario mediante HTML y JavaScript, las cuales permiten monitorear variables en tiempo real, a traves de cualquier navegador web desde un PC o dispositivo Movil, solo ingresando la direccion IP del PLC, sin necesidad de instalar software adicional, permitiendo monitorear procesos sin estar en la planta.
- **SIMATIC WinCC Unified:** Es la nueva plataforma HMI/SCADA de Siemens integrada en TIA Portal, diseñada para la visualización, control y supervisión de procesos industriales. Utiliza tecnologías web modernas como HTML5, JavaScript y SVG, lo que permite interfaces flexibles, escalables y accesibles desde distintos dispositivos. Ofrece mayor usabilidad, rendimiento y seguridad, además de integración con IT y entornos de Industria 4.0. Es la evolución del clásico WinCC, con mejor capacidad gráfica, escalabilidad y reutilización de componentes.

1.5.2. Opciones de la competencia

- **Rockwell Automation (Allen-Bradley):** Los Controladores CompactLogix y GuardLogix permiten la integración con FactoryTalk ViewPoint, que habilita acceso web a las aplicaciones de HMI desarrolladas en FactoryTalk View SE.

- **Schneider Electric:**Sus controladores Modicon permiten integración con EcoStruxure Web Server, ofreciendo interfaces HTML configurables y acceso remoto seguro.
- **Beckhoff:**Con su sistema TwinCAT HMI, basado en HTML5 y JavaScript, ofrece una plataforma altamente flexible para crear dashboards web escalables.
- **Wago:**Sus controladores PFC200 incluyen un servidor web que permite generar aplicaciones HTML5 directamente desde el entorno e!COCKPIT.

1.6. Tecnologías Web para HMI

1.6.1. HTML

HTML es un estándar internacional que define la estructura y el contenido de las páginas web. HTML5 integra HTML, CSS y JavaScript, ofreciendo mejoras como menor tiempo de carga, soporte para multimedia, geolocalización y gráficos, y adaptación a distintos dispositivos. Funciona sobre el protocolo HTTP y es gratuito, fácil de aprender, compatible con los principales navegadores y seguro para la gestión de información.

1.6.2. HTML5

Es la última versión del lenguaje HTML que se utiliza para crear y estructurar el contenido de las páginas web. Ofrece una mejor experiencia de usuario y es más compatible con los dispositivos móviles. Con HTML 5, puedes agregar elementos multimedia, gráficos vectoriales, animaciones, efectos visuales y mucho más, directamente en tu código HTML.

■ Características:

- **Etiquetas Semánticas:**Ayudan a los desarrolladores a estructurar mejor el contenido de sus páginas web.
- **Multimedia Integrada y Gráficos Vectoriales:**Ahora puedes insertar fácilmente elementos de audio y video utilizando las etiquetas.
- **APIs y Funcionalidades Avanzadas:**Permiten a los desarrolladores acceder a funcionalidades avanzadas del navegador y del dispositivo.
- **Diseño Responsivo y Adaptabilidad Móvil:**Permite a los desarrolladores crear sitios web y aplicaciones móviles que se ajustan y responden de manera inteligente a diferentes tamaños de pantalla y orientaciones.
- **Almacenamiento Local y Offline:**Esto se logra utilizando la API de almacenamiento web, que permite a las aplicaciones web almacenar datos en el dispositivo del usuario, incluso cuando no hay conexión a Internet.
- **Mejora en la Interacción y la Experiencia de Usuario:**Ahora puedes utilizar atributos como draggable para arrastrar y soltar elementos en la página, contenteditable para editar el contenido directamente en el navegador y autofocus para enfocar automáticamente un campo de entrada al cargar la página. Estas características agregan interactividad y mejoran la usabilidad de los sitios web.

1.6.3. CSS

El código CSS, junto con HTML, permite darle forma, color y posición a una página web. Las siglas CSS significan "Hojas de estilo en cascada", llamadas así porque se leen y aplican de arriba hacia abajo. Su objetivo es separar la presentación del contenido: los documentos HTML contienen únicamente la información y los datos, mientras que los documentos CSS definen el estilo, como diseño, colores y formas.

■ **Ventajas:**

- **Si se requieren hacer modificaciones visuales**, se realizara en un sólo lugar y se aplica a todo el sitio
- **Se reduce la duplicación de estilos en diferentes lugares.**
- **Es más sencillo organizar y hacer cambios.**
- **La información a transmisir es menor**, por lo tanto las páginas se descargan más rápido.
- **Es más fácil crear versiones diferentes para otros dispositivos.**

1.6.4. JavaScript

JavaScript es un lenguaje de programación de alto nivel utilizado para dotar de dinamismo e interactividad a las páginas web. Junto con HTML y CSS, constituye una de las tecnologías fundamentales del entorno web. Permite realizar acciones como mostrar ventanas emergentes, modificar elementos al interactuar con el cursor o ejecutar animaciones que mejoran la experiencia del usuario. Se ejecuta directamente en el navegador, lo que optimiza la velocidad y el rendimiento de los sitios.

■ **Ventajas:**

- Aumenta la interactividad en las páginas web sin necesidad de recargar el sitio.
- Mejora la experiencia del usuario mediante animaciones, transiciones y respuestas dinámicas.
- Reduce la carga del servidor, al ejecutarse en el navegador del cliente.
- Facilita la validación y manipulación de formularios y elementos HTML en tiempo real.
- Permite integrar contenido multimedia y crear aplicaciones web más completas.

1.6.5. HTTP y HTTPS

HTTP (HyperText Transfer Protocol) es un protocolo de comunicación utilizado en la Web para transferir información entre clientes y servidores mediante un modelo de solicitud y respuesta. Permite la transmisión de recursos como documentos HTML, imágenes o archivos multimedia, operando en la capa de aplicación del modelo OSI. Sin embargo, no incluye mecanismos de seguridad, por lo que los datos pueden ser interceptados o modificados.

HTTPS (HyperText Transfer Protocol Secure) es una versión segura de HTTP que utiliza protocolos de cifrado como SSL/TLS para garantizar la confidencialidad, integridad y autenticidad de la información transmitida. Actualmente, es el estándar en la navegación web, especialmente en sitios que manejan datos sensibles.

■ **Ventajas:**

- Protege la información transmitida, evitando accesos o modificaciones no autorizadas.
- Garantiza la autenticidad del servidor mediante certificados digitales.
- Ofrece una conexión segura.
- Es fundamental en sitios con transacciones o datos personales.
- Mejora el posicionamiento web en motores de búsqueda.

1.6.6. Resumen tecnologías web

- La HTML5 es la última versión del lenguaje HTML, permite estructurar contenido web e integrar multimedia de forma nativa.
- El CSS es un lenguaje de hojas de estilo cascada que define la apariencia y formato de los elementos HTML.
- JavaScript es un lenguaje de programación que agrega dinamismo e interactividad a las páginas web.
- El protocolo de transferencia de hipertexto HTTP, permite la comunicación entre cliente y servidor.
- HTTPS es una versión segura de HTTP que emplea cifrado SSL/TLS para proteger la comunicación.

2. Capítulo 2: Diseño e implementación física de control

2.1. Normativas y estándares aplicados al sistema

2.1.1. Normas eléctricas y de seguridad industrial

- NCh 4/2003 – Protección contra descargas eléctricas: Establece los requisitos generales de seguridad para prevenir choques eléctricos en instalaciones de baja tensión.
- Reglamento de Seguridad de las Instalaciones Eléctricas (RSIE)– *Superintendencia de Electricidad y Combustibles (SEC)*: Define las exigencias para la ejecución, operación y mantenimiento seguro de instalaciones eléctricas en Chile.
- NCh Elec. 2/84 – Instalaciones eléctricas de baja tensión: Norma general sobre canalizaciones, conductores, protecciones y dispositivos de maniobra en tableros eléctricos.
- RIC-NCh-EL-N° 2 – Tableros eléctricos: Especifica requisitos de diseño, fabricación, etiquetado y seguridad de tableros eléctricos industriales.

2.1.2. Normativas para bomba centrífuga CP 158

- Directiva 2006/42/CE: Seguridad de máquinas
- Directiva 2014/35/UE: Equipos eléctricos de baja tensión
- Directiva 2014/30/UE: Compatibilidad electromagnética (CEM)
- IEC 60034: Maquinas eléctricas rotativas-rendimiento, protección y clasificación térmica (Clase F)
- IEC 60072: Dimensiones y montaje de motores eléctricos
- IEC 60529: Grados de protección IP (IPX4 en este modelo)
- EN ISO 5199 / 2858: Bombas centrífugas normalizadas

2.1.3. Normativas para el SITRANS FM MAG 6000

- IEC 61010-1: Requisitos de seguridad para equipos de medición, control y laboratorio.
- IEC 61326-1: Compatibilidad electromagnética para equipos industriales.
- NAMUR NE43: Señalización estándar de fallas en transmisores analógicos (4–20 mA).
- EN 60529: Grado de protección IP (IP67 en este modelo).
- OIML R49: Requisitos metrológicos para medidores de agua electromagnéticos.
- ISO 9001: Certificación del sistema de gestión de calidad del fabricante.
- Directiva 2014/32/UE (MID): Instrumentos de medida industriales.

2.1.4. Normativas aplicables al PLC y comunicaciones industriales

- IEC 61131-3 / CLNC-IEC 61131-3 – Controladores programables: Norma que define los lenguajes de programación, estructura de software y comportamiento de los PLC.
- IEC 61158 / IEC 61784 – Redes de comunicación industrial y perfiles de comunicación de campo (PROFINET): Establece los protocolos de comunicación y capas físicas utilizados por redes industriales Ethernet-based, incluyendo PROFINET.
- Manual técnico PROFINET – Siemens / PI (PROFIBUS y PROFINET International): Guía oficial sobre el diseño de redes PROFINET, direccionamiento, diagnóstico y cableado, basada en las normas IEC 61158 y IEC 61784. (Fuente: Siemens Industry Support Portal / PI International)
- UL/CE/CSA: Certificaciones de conformidad eléctrica y de seguridad
- ISO 13849 / IEC 61508: Seguridad funcional y fiabilidad de sistemas de control
- IEC 61000-6-2 / 6-4: Inmunidad y emisiones electromagnéticas en entornos industriales.

2.1.5. Normas de seguridad funcional y puesta a tierra

- IEC 60204-1 / CLNC-IEC 60204-1 – Seguridad de las máquinas: Equipamiento eléctrico de las máquinas
- NCh Elec. 3/84 – Puesta a tierra en instalaciones eléctricas: Define los métodos de conexión a tierra, resistencias máximas permitidas y medidas de protección frente a fallas.
- IEC 61508 / CLNC-IEC 61508 – Seguridad funcional de sistemas eléctricos/electrónicos programables

Componente	Normas principales	Aspecto regulado
Bomba PEDROLLO CP 158	IEC 60034, IEC 60529, CE	Seguridad eléctrica y mecánica
Variador SINAMICS G120	IEC 61800, IEC 60204-1, CE, UL	Control eléctrico, CEM, seguridad funcional
Transmisor SITRANS MAG 6000	IEC 61010, NAMUR NE43, IP67, MID	Medición, seguridad y precisión
PLC Siemens S7-1500	IEC 61131, IEC 61784, ISO 13849	Control, comunicación y seguridad

Tabla 2.1: Normativas principales aplicadas a los componentes del sistema

2.2. Comunicación entre equipos

2.2.1. PLC S7-1500 y Sinamics G120

En la comunicación entre el PLC Siemens S7-1500 y el Variador de Frecuencia SINAMICS G120, los equipos son conectados mediante el protocolo PROFINET (figura 2.0), para el control del variado se utiliza el telegrama estándar 1 (PZD 2/2). Este telegrama corresponde a un formato de intercambio de datos definido por el perfil PROFIdrive, empleado en comunicaciones PROFINET o PROFIBUS(figura 2.1).

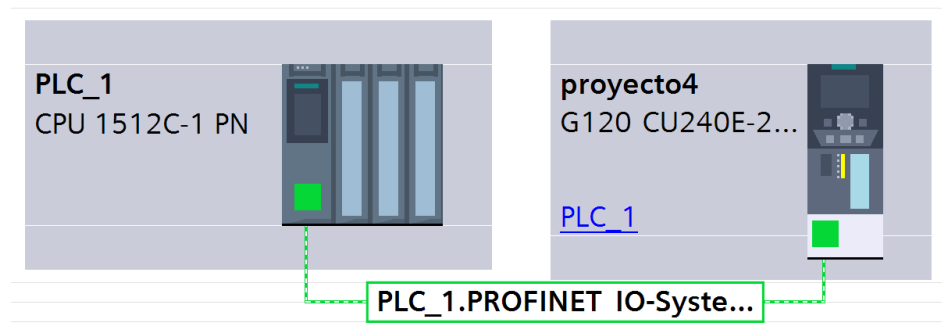


Figura 2.0: conexión PLC-VDF

El telegrama define la estructura y la cantidad de palabras de datos de proceso (PZD) que se transmiten de forma cíclica entre el PLC y el variador. En este caso, el formato PZD 2/2 indica que se envían dos palabras de 16 bits desde el PLC hacia el variador y otras dos palabras desde el variador hacia el PLC. El telegrama estándar 1 (PZD 2/2) permite establecer el control básico del variador desde el PLC. A través de este intercambio cíclico, el PLC puede:

- Encender o detener el motor de forma remota.
- Definir la consigna de velocidad o frecuencia.
- Supervisar el estado del variador (listo, en marcha, fallo, etc.).
- Leer el valor real de velocidad o frecuencia del motor.

Este telegrama se considera el formato más simple y común, ideal para aplicaciones donde se requiere únicamente el control esencial de movimiento. En sistemas más avanzados o con mayores requerimientos de diagnóstico, pueden emplearse telegramas más extensos, como el Telegrama 3 (PZD 4/4), que incorpora información adicional de control y supervisión.

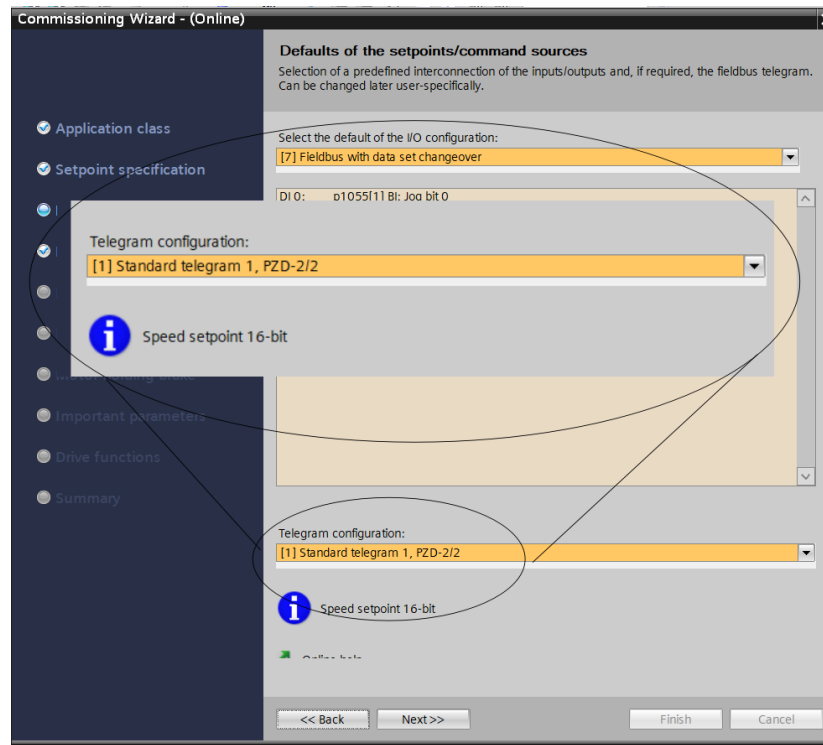


Figura 2.1: Telegrama estándar 1

2.2.2. PLC S7-1500 y Sensores

La conexión entre el PLC S7-1500 y los sensores analógicos (nivel, flujo y presión) se realiza mediante módulos de entrada analógica del controlador. Las señales se estandarizan en los rangos 4–20 mA o 0–10 V, las cuales son escaladas internamente en el PLC a valores de ingeniería mediante bloques de conversión (INT → REAL). Los sensores físicos, (MG 6000 de flujo y P320 de presión) tienen 4 hilos, 2 van conectados a su entrada analógica correspondiente y los otros 2 a una fuente externa de alimentación, de 24V DC.(imagen...) En esta etapa del proyecto se encuentra implementado el sensor de nivel en el entorno Factory I/O, mientras que los sensores de flujo y presión están integrados físicamente en etapas posteriores del proyecto.

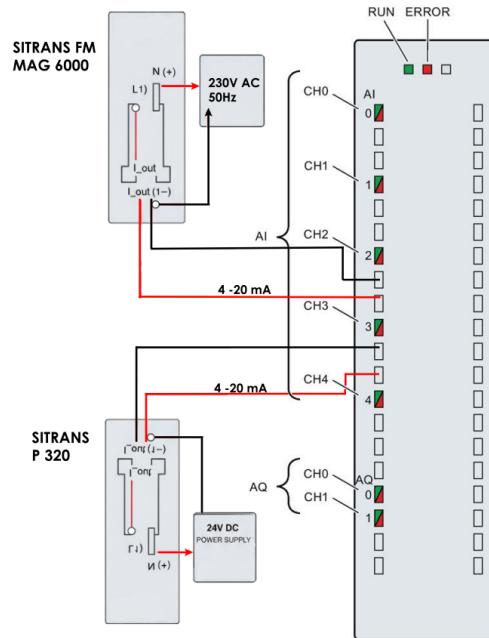


Figura 2.2: Conexión de sensores a módulo analógico

2.2.3. PLC S7-1500 y Válvulas actuadoras

En la simulación con Factory I/O, se usan 2 válvulas de llenado y descarga, las cuales usan señales de 0 a 10 volts para su control, estas válvulas son conectadas a entradas virtuales simuladas, no presentes en el módulo analógico del PLC.

2.2.4. PLC S7-1500 y HMI web

La comunicación entre el PLC Siemens S7-1500 y la interfaz HMI Web se realiza mediante el servidor web integrado del controlador, basado en la tecnología WinCC Unified. Con la actualización del firmware a la versión 2.9, esta funcionalidad se amplía, permitiendo la creación de páginas web personalizadas directamente desde el entorno de ingeniería TIA Portal, sin requerir conocimientos avanzados de programación en HTML o JavaScript.

- **Funcionamiento:** El servidor web del PLC actúa como intermediario entre el controlador y el cliente (navegador web o panel HMI). A través de este servidor, el usuario puede monitorear y controlar variables del proceso en tiempo real, utilizando una interfaz visual creada en WinCC Unified.

Las páginas diseñadas en el editor de WinCC Unified se comportan como pantallas HMI convencionales, pero se ejecutan en un navegador web. Durante la configuración, el proyecto de visualización se asocia directamente al PLC, de modo que al transferir el programa, las páginas web también se cargan en el controlador.

2.3. Programa de control y Parámetros PID

2.3.1. Descripción general del sistema (Nivel)

El sistema consiste en un tanque con sensor de nivel analógico, válvula de llenado, válvula de descarga y potenciómetro de referencia. Estos elementos son simulados en Factory I/O y enlazados al PLC físico mediante conexión Ethernet. El objetivo es mantener el nivel del tanque en el valor deseado configurado por el usuario mediante el potenciómetro.

2.3.2. Programación TIA Portal de Nivel

El programa principal se implementó dentro del bloque OB1 (Main) y contiene las redes lógicas encargadas del control de arranque/parada, escalado de señales analógicas, ejecución del control PID y control de las válvulas de llenado y descarga.

- La primera red implementa la función de arranque y paro mediante un circuito enclavado. El contacto I0.0 (Start) permite habilitar la operación del sistema, mientras que I0.2 (Stop) detiene el funcionamiento. La salida Q0.0 (LP) mantiene el enclavamiento mientras el proceso esté activo.

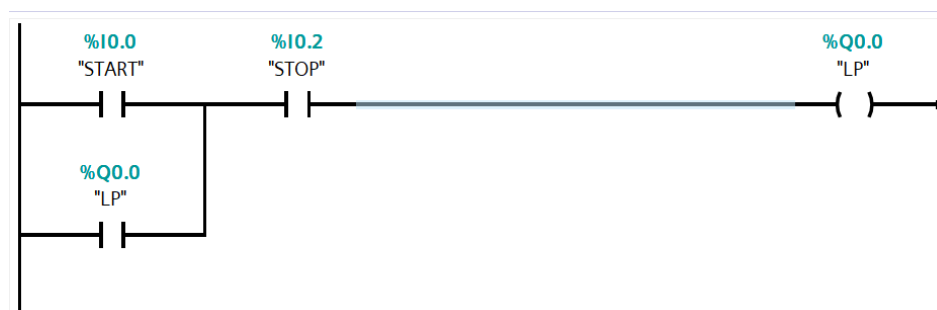


Figura 2.3: Partir/parar Nvl

- Las siguientes redes del OB1 realizan el procesamiento de las señales analógicas provenientes del potenciómetro y del sensor de nivel.

El bloque SP DB convierte la señal del potenciómetro (IW104) en la variable de consigna SP, expresada tanto en milímetros como en porcentaje. De igual manera, el bloque SENSOR DB procesa la señal analógica del sensor de nivel (IW100) para obtener el valor PV (valor de proceso) en ambas unidades.

Es importante destacar que, para el funcionamiento del bloque PID Compact, se utilizaron las variables expresadas en porcentaje (SP y PV), ya que permiten una mejor normalización dentro del rango operativo del controlador.

Por otro lado, las variables expresadas en milímetros (SP mm y PV mm) se destinaron exclusivamente a la visualización en el display digital del entorno Factory I/O, donde se muestran los valores instantáneos de consigna y nivel real del tanque.

Finalmente, ambos valores se convirtieron a formato entero mediante los bloques CONV Real to Int, con el fin de ser transmitidos a las direcciones de salida (QW104 y QW106) utilizadas por la interfaz de monitoreo.

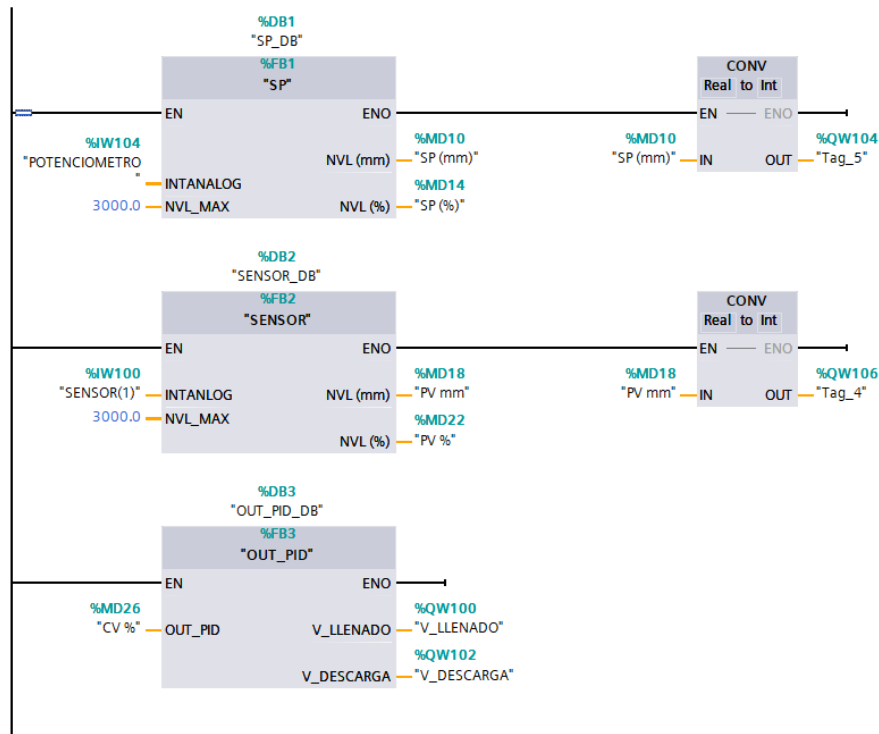


Figura 2.4: Programa de funcionamiento Nvl

2.3.3. Parametrización PID compact

- El control de nivel se realizó mediante el bloque estándar PID Compact, almacenado en el DB4. Este bloque calcula la variable de control CV en función de la diferencia entre el valor deseado (SP) y el valor medido (PV). La salida CV controla la apertura de las válvulas de llenado (QW100) y descarga (QW102), regulando así el nivel del tanque.

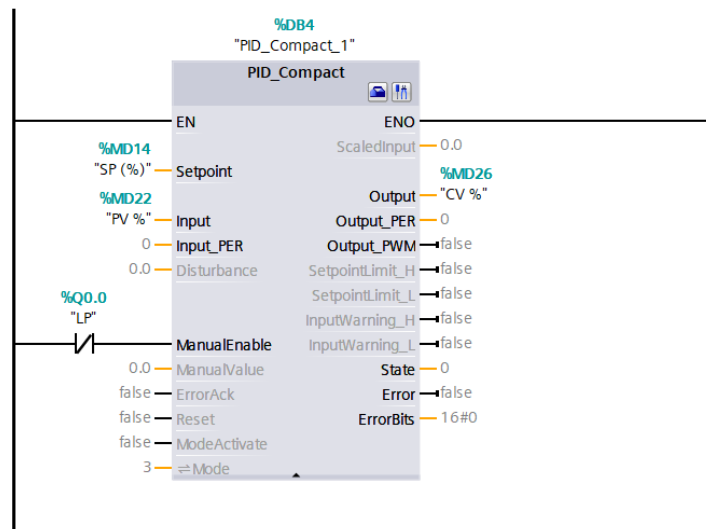


Figura 2.5: PID compact Nvl

Los parámetros de ajuste del controlador fueron determinados experimentalmente, buscando una respuesta rápida sin sobreoscilaciones excesivas. Los valores finales configurados fueron:

Ganancia proporcional (K_p)	12.28378
Tiempo integral (T_i)	13.54873 s
Tiempo derivativo (T_d)	0.1 s
Coeficiente de retardo derivativo	0.01
Ponderación proporcional	0.256
Ponderación derivativa	0.0
Tiempo de muestreo del algoritmo	0.199998 s

Tabla 2.2: Parámetros PID Nivel

- **K_p :** Esta acción de control intenta minimizar el error del sistema. Cuando el error es grande, la acción de control es grande y tiende a minimizar este error. Aumentar la acción proporcional K_p tiene los siguientes efectos:
 1. Aumenta la velocidad de respuesta del sistema.
 2. Disminuye el error del sistema en régimen permanente.
 3. Aumenta la inestabilidad del sistema.
- **K_d :** El controlador debe reconocer la velocidad a la que el sistema se acerca a la referencia para poder frenarle con antelación a medida que se acerque a la referencia deseada y evitar que la sobrepase. Aumentar la constante de control derivativa K_d tiene los siguientes efectos:
 1. Aumenta la estabilidad del sistema controlado.
 2. Disminuye un poco la velocidad del sistema.
 3. El error en régimen permanente permanecerá igual.
- **K_i :** Se consigue reducir el error del sistema en régimen permanente. La desventaja de utilizar la acción integral consiste en que esta añade una cierta inercia al sistema y, por lo tanto, le hace más inestable. Aumentar la acción integral K_i tiene los siguientes efectos:
 1. Disminuye el error del sistema en régimen permanente.
 2. Aumenta la inestabilidad del sistema.
 3. Aumenta un poco la velocidad del sistema.

2.3.4. Modo de operación Nivel

El sistema opera de manera automática al presionar el botón Start. El PID regula el nivel del tanque según la consigna establecida. En caso de presionar Stop, el sistema desactiva las salidas y detiene el proceso. El bloque PID Compact permite cambiar entre modo automático y manual si se requiere realizar pruebas.

2.3.5. Resultados y comportamiento del sistema de Nivel

Durante las pruebas se observó que el sistema logra estabilizar el nivel del tanque en torno al valor de consigna definido por el potenciómetro. El controlador PID ajustado proporciona una respuesta rápida y estable, sin oscilaciones significativas. Se verifica el correcto funcionamiento del lazo cerrado de control de nivel, así como la comunicación continua entre el PLC físico y el entorno de simulación Factory I/O.

2.3.6. Programación TIA Portal de Flujo y Presión

La estructura lógica de este programa replica la arquitectura de control empleada del programa de nivel (sección 2.3.2), en el ámbito de escalamiento de la señal de entrada (sensor) adaptado a la dirección correspondiente al lazo, la señal escalada del sensor, ingresa al bloque PID compact (Figura 2.5) asignado a su variable (flujo o Presión). En la salida de este bloque, se encuentra la variable de control resultante (CV). Se convertirá de porcentaje a RPM, considerando un rango del valor máximo permitido por la bomba (2.900 rpm) hasta el mínimo, que es el equivalente al caudal mínimo (Q) de la bomba (10 L/min), este valor se obtiene midiendo el caudal y bajando las RPM del motor hasta encontrar la indicada.

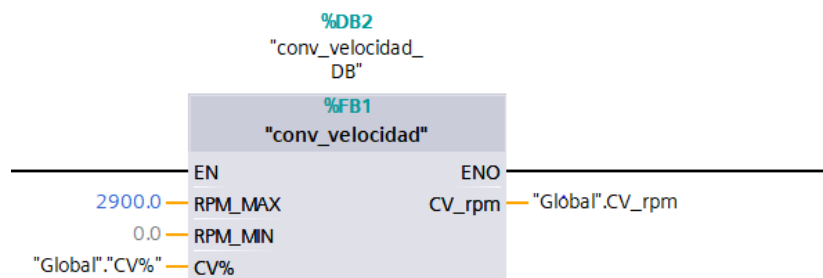


Figura 2.6: Bloque de escalado RPM

2.3.7. Bloque SinaSpeed

El programa descrito en la sección anterior (2.3.6), continua con el control del VDF, quien actua sobre la bomba, este control se asigna mediante el bloque SinaSpeed (Figura 2.7). A continuación se describe la función de sus entradas utilizadas.

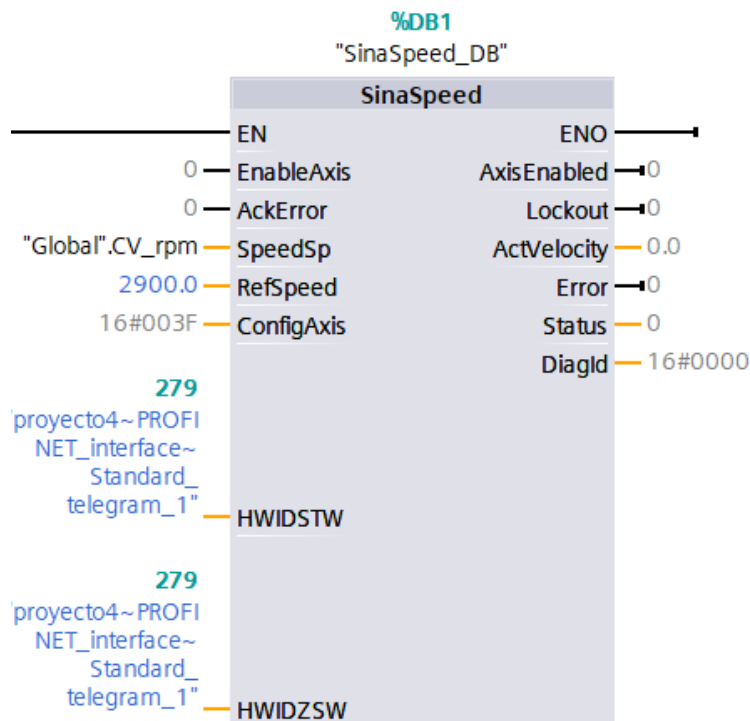


Figura 2.7: Bloque SinaSpeed

- SpeedSp (Real): Consigna de velocidad en RPM(Setpoint).
- RefSpeed (Real): Velocidad de referencia. Es el valor que el VDF interpreta como 100 de la velocidad.
- HWID (STW / ZSW): Las direcciones del telegrama(palabra) de salida y estado (PLC - VDF).

2.3.8. Asignación de entradas y salidas del PLC (NIVEL)

Tipo de señal	Dirección PLC	Descripción	Función
Entradas digitales (I)	%I0.0	Botón Start	Inicia el sistema de control
	%I0.1	Indicador luminoso 1	Señal de habilitación visual
	%I0.2	Botón Stop	Detiene el sistema
Salidas digitales (Q)	%Q0.0	Luz Start	Señal visual de proceso activo
	%Q0.1	Indicador luminoso	Señal intermedia / prueba
	%Q0.2	Luz Stop	Señal visual de proceso detenido
Entradas analógicas (IW)	%IW100	Sensor de nivel (Factory I/O)	Entrada analógica de nivel (PV)
	%IW102	Sensor de flujo	Entrada analógica del transmisor de flujo
	%IW104	Potenciómetro de referencia	Señal de consigna (SP)
Salidas analógicas (QW)	%QW100	Válvula de llenado (Fill valve)	Controlada por señal PID (CV)
	%QW102	Válvula de descarga (Discharge valve)	Control de vaciado
	%QW104	Variable SP (entera)	Visualización en Factory I/O
	%QW106	Variable PV (entera)	Visualización en Factory I/O

Tabla 2.3: Asignación de Entradas y Salidas del PLC para el lazo de nivel.

3. Capítulo 3: Diseño e Implementación de HMI WEB

3.1. Diseño e Integración de la HMI Web

La integración de la HMI Web se desarrolló utilizando la plataforma WinCC Unified dentro de TIA Portal, permitiendo la supervisión y operación remota del proceso a través de navegadores compatibles utilizando el protocolo HTTP/HTTPS. Para lograr esto, se implementó una arquitectura cliente-servidor donde el PLC Siemens S7-1500 actúa como servidor web, alojando el proyecto de HMI y gestionando la actualización en tiempo real de las variables de proceso.

Desde el punto de vista de comunicaciones, el sistema utiliza PROFINET (basado en Ethernet Industrial) como red principal para la vinculación entre:

- El PLC S7-1500
- La HMI Web
- El entorno de simulación Factory I/O
- El Variador de Frecuencia SINAMICS G120
- Los transmisores y dispositivos de campo virtuales

Arquitectura del sistema: La arquitectura implementada corresponde a un modelo centralizado, donde el PLC funciona como nodo principal de control y distribución de información:

1. **Nivel de campo:** Sensores y actuadores simulados en Factory I/O, transmisores de nivel, flujo y presión, variador de frecuencia SINAMICS G120
2. **Nivel de control:** PLC Siemens S7-1500 (CPU 1512C-1 PN), ejecución del lazo PID Compact, procesamiento de SP y PV
3. **Nivel de supervisión:** HMI Web alojada en el PLC, acceso desde navegadores de PC o tablet

3.1.1. Arquitectura general de la interfaz

La Interfaz Hombre-Máquina (HMI) Web se diseñó bajo una robusta arquitectura Cliente-Servidor de tres capas, un modelo ideal para la supervisión y el control industrial que ofrece accesibilidad remota, escalabilidad y una clara separación de responsabilidades entre los componentes.

1. **Capa de Presentación (Cliente):** Esta capa es la que interactúa directamente con el usuario y reside en cualquier navegador web (PC, móvil, tablet), actuando como el cliente del sistema.
 - **Tecnología y Responsabilidad:** La HMI Web se generó utilizando Siemens WinCC Unified, una plataforma que produce interfaces basadas en tecnología HTML5, eliminando la necesidad de programación manual (frontend) y asegurando compatibilidad universal en cualquier navegador. Su funcionalidad principal es permitir la visualización en tiempo real de la Variable de Proceso (PV), recibir e interpretar el Set Point (SP) ingresado por el usuario y gestionar los comandos operativos (PARTIR, PARAR, Control HMI, Modo Manual/Automático). El navegador funciona como cliente ligero accediendo al PLC mediante el protocolo HTTP/HTTPS.
2. **Capa de Servidor:** El servidor actúa como el nexo de comunicación, traduciendo las peticiones web en protocolos industriales y gestionando la actualización de datos.
 - **Protocolos de Interfaz y Comando:** La comunicación está gestionada por el PLC S7-1500 mediante los servicios de comunicación internos de WinCC Unified, que aloja el proyecto de HMI Web. Se utilizan dos mecanismos: HTTP/HTTPS para entregar la interfaz web al navegador y recibir comandos del usuario; y el protocolo industrial S7 Communication (S7Comm), que se emplea internamente para el intercambio cíclico y determinístico de variables entre la HMI Web y el PLC, asegurando la actualización en tiempo real de la información crítica asociada al lazo de control (PV, SP, estados, modos).
3. **Capa de Control (Dispositivo):** Esta capa contiene la inteligencia del sistema: el PLC y el entorno de simulación/actuadores.
 - **Control y Conectividad de Campo:** El PLC es responsable de ejecutar los algoritmos de control del lazo cerrado (PID Compact), realizar la conversión y normalización de variables, y gestionar los bloques de datos del sistema. La comunicación de campo con el simulador Factory I/O y con el variador de frecuencia SINAMICS G120 se realiza a través del protocolo PROFINET IO, que asegura una transmisión cíclica y en tiempo real de las entradas del proceso (PV) y de las salidas de control (CO), permitiendo así una supervisión coherente entre el comportamiento dinámico del proceso y lo mostrado en la HMI Web.

3.1.2. HMI Web del lazo de nivel

1. **Visualización de Variables (PV y SP en mm)** La interfaz muestra dos campos principales asociados al comportamiento del sistema:

- **PV (Process Value):** representa el nivel medido del estanque en milímetros (mm), obtenido directamente desde el transmisor virtual configurado en Factory I/O.
- **SP (Setpoint):** corresponde a la referencia de nivel ingresada por el usuario para el controlador PID.

Ambos valores se actualizan en tiempo real utilizando el protocolo S7 Communication, garantizando la coherencia entre la variable física (o simulada) y la representación gráfica en pantalla.

2. **Ingreso y Validación del Setpoint (SP)** El operador puede ingresar el valor deseado del nivel (SP) directamente desde un campo numérico habilitado en la HMI Web. El proceso funciona de la siguiente manera:

- **Ingreso del valor por el usuario:** el operador escribe el nivel requerido en milímetros.
- **Validación en la HMI:** Se implementa una validación en la HMI Web que restringe el ingreso de valores del Set Point (SP) a números dentro del rango operativo permitido para el estanque (ej. 0 a 3000 mm, como sugiere la figura), impidiendo la entrada de valores negativos o fuera de dicho límite.
- **Envío del SP al PLC:** Una vez que el SP es validado en la HMI, se transmite al controlador mediante el Protocolo S7. Este valor se almacena inmediatamente en el bloque de datos (Data Block) asignado al lazo de control PID. Finalmente, dentro del controlador, el valor del SP se convierte y normaliza en un porcentaje de 0 a 100 % para que pueda ser utilizado como entrada por el algoritmo de control PID Compact.

3. Elementos de Operación y Botones Funcionales

- **PARTIR:** habilita el lazo de control e inicia la operación automática del nivel.
- **PARAR:** deshabilita el control del nivel y devuelve el lazo a estado seguro.
- **Control HMI:** habilita la operación remota desde la interfaz web, permitiendo que los comandos web tomen prioridad.
- **Control Manual:** transfiere la operación al modo manual, donde el usuario puede manipular directamente la señal de control (actuador) sin intervención del PID.
- **Indicador de señal de control:** un dial gráfico muestra la salida del controlador (0–100 %), reflejando la apertura de la válvula o la acción del actuador sobre el sistema.

4. Flujo de Datos del Sistema

- **Ciclo de Lectura del Nivel (PV):** El valor de proceso (PV) es generado por el sensor simulado en Factory I/O y enviado cíclicamente al PLC mediante PROFINET IO. El PLC es responsable de procesar, escalar y convertir el dato a milímetros (mm). Finalmente, la HMI Web consulta este valor actualizado con alta frecuencia a través de S7 Communication para reflejarlo en tiempo real tanto en los campos numéricos como en la representación gráfica del nivel en el estanque.
- **Ciclo de Escritura del Set Point (SP):** El usuario introduce el SP (mm) en el navegador. La HMI Web realiza la validación del dato y, una vez aprobado, lo transmite al PLC utilizando el protocolo S7 Communication (S7Comm) para el intercambio de variables con el PLC. El PLC procesa el SP, lo convierte a porcentaje (0 – 100 %) y lo aplica como referencia al bloque de control PID Compact. El controlador calcula entonces la nueva Salida de Control (CO), la cual es enviada a Factory I/O (o al actuador virtual) para modificar el flujo del estanque, cerrando el lazo y provocando un cambio en la Variable de Proceso (PV).



Figura 3.0: HMI Web Nivel

3.1.3. Diagrama de lazo de control de flujo

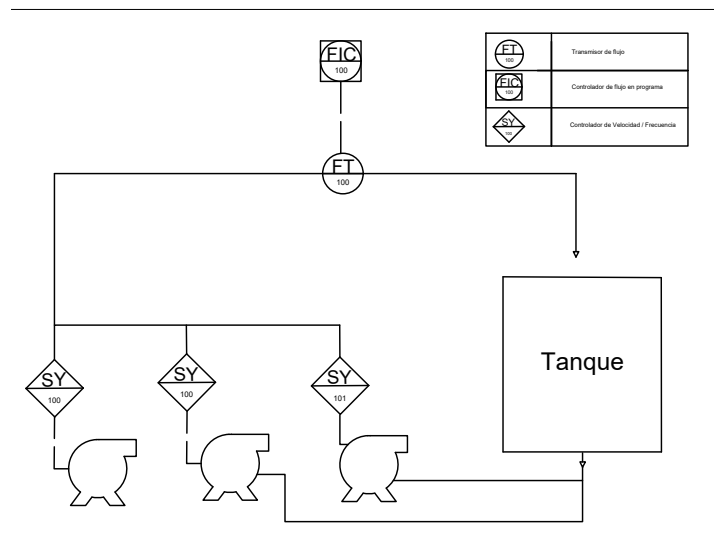


Figura 3.1: Diagrama lazo físico

3.1.4. Lectura y actualización de variables en la HMI

La lectura y actualización de variables en la HMI Web se realiza mediante un mecanismo de comunicación cíclica entre el navegador del usuario y el PLC Siemens S7-1500. Este proceso permite que la interfaz muestre información en tiempo real y procese las acciones del operador de forma inmediata, garantizando una supervisión fluida del sistema.

1. **Lectura de Variables desde el PLC (PV, estados, modos)** La HMI Web obtiene periódicamente las variables del proceso utilizando el protocolo S7 Communication (S7Comm), que permite el intercambio directo de datos con los bloques de memoria del PLC.

Las principales variables leídas son:

- **PV (Process Value):**
 - Nivel → sensor simulado en Factory I/O
 - Flujo → FT-100
 - Presión → PT-101
- **Estados del controlador:**
 - PID en automático o manual
 - Control HMI activado
 - Interlock activo
 - Estado de PARTIR/PARAR
- **Valor de salida del controlador (CO):** Índice porcentual (0–100%) enviado a los actuadores SY-100 / SY-101.

2. **Escritura de Variables hacia el PLC (SP y comandos de operación)** Las variables que el usuario modifica desde la HMI Web se transmiten al PLC utilizando también S7Comm, el cual garantiza integridad y sincronización de datos.

Las principales variables escritas son:

- **SP (Setpoint):** Ingresado por el usuario en la interfaz.

La HMI valida su rango, luego envía el valor al bloque de datos del controlador PID correspondiente:

- SP del nivel → DB del lazo de nivel
- SP del flujo → DB del lazo FIC-100
- SP de presión → DB del lazo PIC-101

Dentro del PLC, cada SP se convierte internamente a un valor normalizado (0–100 %) para ser usado por el bloque PID Compact.

- **Comandos del operador:** PARTIR, PARAR, Activar Control HMI, seleccionar modo Manual o Automático

3. **Procesamiento interno en el PLC antes de enviar las variables** Cada señal recibida desde síntesis de campo (Factory I/O, FT-100, PT-101) es procesada en el PLC antes de mostrarse en la HMI:

- Filtrado o suavizado.
- Conversión de unidades (por ejemplo, de un rango bruto 0–27648 a bar, L/min o mm).
- Normalización de señales para el PID Compact.
- Limitación de valores para evitar saturación.
- Ruteo a los bloques de datos asociados a cada HMI.

4. **Sincronización en tiempo real entre HMI y PLC** El intercambio constante entre:

- HMI Web → PLC (SP, botones, comandos)
- PLC → HMI Web (PV, CO, estados)

3.1.5. HMI Web del lazo de presión

1. **Visualización de Variables:** La HMI Web del lazo de presión muestra las variables correspondientes al controlador PIC-101, compuesto por:

- **PV (Process Value):** presión medida en la línea por el transmisor PT-101, proveniente del proceso simulado en Factory I/O y transferida al PLC mediante PROFINET IO.
- **SP (Setpoint):** presión objetivo definida por el operador para el lazo de control. Ambos valores se actualizan en tiempo real mediante S7 Communication, permitiendo supervisar la evolución del lazo en la HMI Web.

2. **Ingreso y Validación del Setpoint (SP)** El SP se modifica desde un campo numérico de la interfaz web.

- **Ingreso del SP:** el operador ingresa la presión deseada en unidades de ingeniería (bar / kPa).
- **Validación:** la HMI restringe el SP dentro de los rangos seguros para evitar sobrepresión.
- **Envío al PLC:** una vez validado, el SP es transmitido al PLC mediante S7Comm, almacenándose en el DB del controlador de presión (**PIC-101**), donde se normaliza a 0–100 % para ser utilizado por el bloque PID Compact.

3. Elementos de Operación y Botones Funcionales

- **PARTIR:** habilita el controlador PIC-101 para operar automáticamente.
- **PARAR:** detiene el lazo y lleva la salida a un estado seguro.
- **Control HMI:** habilita el control remoto desde la interfaz web.
- **Control Manual:** permite ajustar manualmente la señal de control.
- **Indicador de señal de control (CO):** representa la apertura o velocidad enviada al actuador asociado (SY-101, controlador de velocidad/frecuencia).

4. Flujo de Datos del Sistema

- **Ciclo de Lectura (PV):** La adquisición de datos se inicia con el sensor PT-101 midiendo la presión de la línea. La señal es enviada al PLC mediante el protocolo PROFINET IO (desde Factory I/O), donde se escala a unidades de ingeniería. Finalmente, la HMI consulta esta Variable de Proceso (PV) utilizando S7Comm y la refleja en tiempo real en su visualización.
- **Ciclo de Escritura (SP):** El proceso se inicia con el ingreso del Set Point (SP) por parte del usuario en la HMI, que es validado y enviado al controlador PIC-101 mediante S7Comm. El PLC se encarga de la conversión del SP a porcentaje, y el bloque PID Compact calcula la Salida de Control (CO), la cual es enviada al actuador SY-101 para ajustar la velocidad de la bomba y mantener la presión deseada.

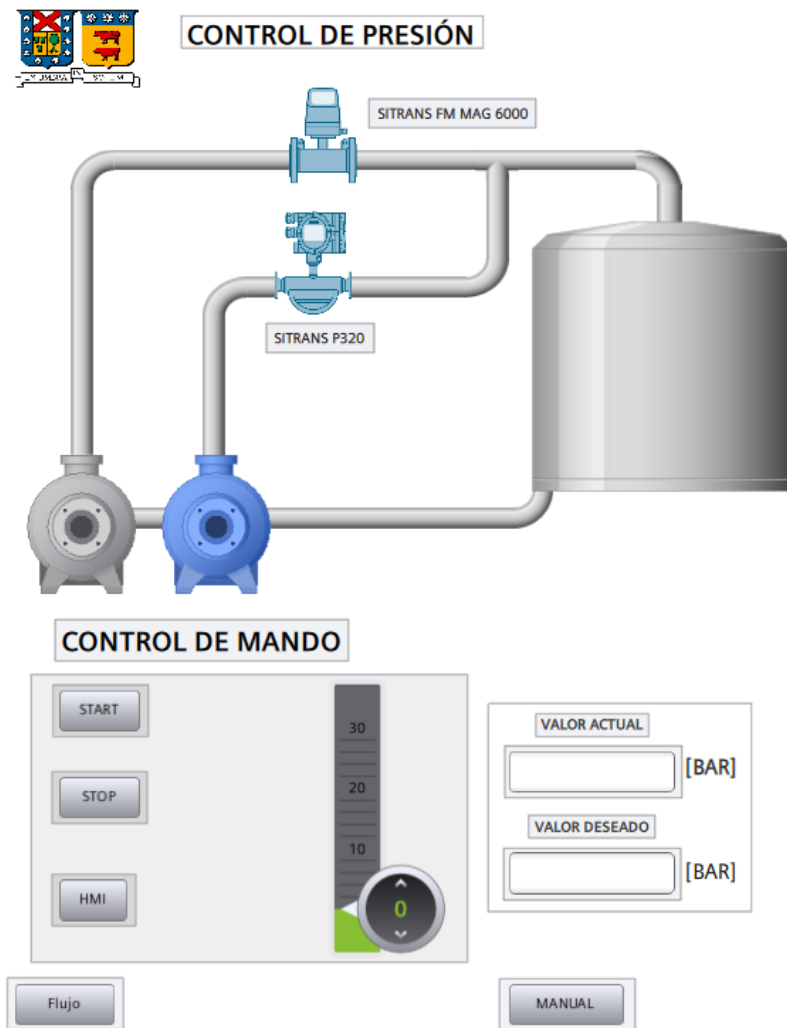


Figura 3.2: HMI Web Presión

3.1.6. HMI Web del lazo de flujo

1. **Visualización de Variables:** La HMI Web del lazo de flujo representa las variables asociadas al controlador FIC-100, permitiendo supervisar en tiempo real el comportamiento del caudal en la línea del proceso.

- **PV (Process Value):** corresponde al caudal medido por el transmisor de flujo FT-100, generado en el entorno simulado de Factory I/O y enviado cíclicamente al PLC mediante PROFINET IO.
- **SP (Setpoint):** representa el caudal objetivo que el operador define para el controlador PID.

Ambos valores se actualizan usando S7 Communication (S7Comm), garantizando coherencia entre el proceso simulado y la visualización en la interfaz web.

2. **Ingreso y Validación del Setpoint (SP)** La HMI permite modificar el valor de caudal deseado desde un campo numérico.

- **Ingreso del SP:** el operador ingresa el SP en unidades de flujo (por ejemplo, L/min o m³/h, según el escalamiento configurado).
- **Validación:** la HMI limita el SP a un rango seguro para evitar sobrecarga hidráulica o cavitación en la bomba.
- **Envío al PLC:** Una vez validado, el SP se transmite al PLC mediante S7Comm, almacenándose en el bloque de datos del controlador FIC-100.
El controlador convierte el SP a un valor porcentual (0–100 %) para ser utilizado por el algoritmo PID Compact.

3. Elementos de Operación y Botones Funcionales

- **PARTIR:** habilita el controlador FIC-100 e inicia el lazo de control automático del flujo.
- **PARAR:** detiene el lazo y lleva la salida del controlador a un estado seguro.
- **Control HMI:** habilita la operación remota desde la interfaz web, dando prioridad a los comandos del usuario sobre la operación local.
- **Control Manual:** permite modificar manualmente la señal de control (CO), independiente del PID.
- **Indicador de señal de control (CO):** un dial o barra representa gráficamente la salida del controlador (0–100 %), la cual se aplica sobre el actuador SY-100, encargado de regular la velocidad de la bomba asociada.

4. Flujo de Datos del Sistema

- **Ciclo de Lectura (PV):** El sensor FT-100 mide el caudal en la tubería principal. El valor es transmitido al PLC desde Factory I/O mediante PROFINET IO, donde el PLC realiza la conversión y el escalado a unidades de ingeniería. Posteriormente, la HMI Web solicita esta Variable de Proceso (PV) a través de S7Comm y la presenta al usuario tanto en valores numéricos como en los elementos gráficos correspondientes del proceso.
- **Ciclo de Escritura (SP):** El usuario ingresa el Set Point (SP) a través del navegador web. La HMI lo valida y lo envía al PLC utilizando S7Comm, donde se normaliza (0–100 %) para el controlador FIC-100. Este controlador PID Compact calcula la Salida de Control (CO), la cual se transmite al actuador SY-100 para modificar la velocidad de la bomba y regular el flujo hacia el tanque

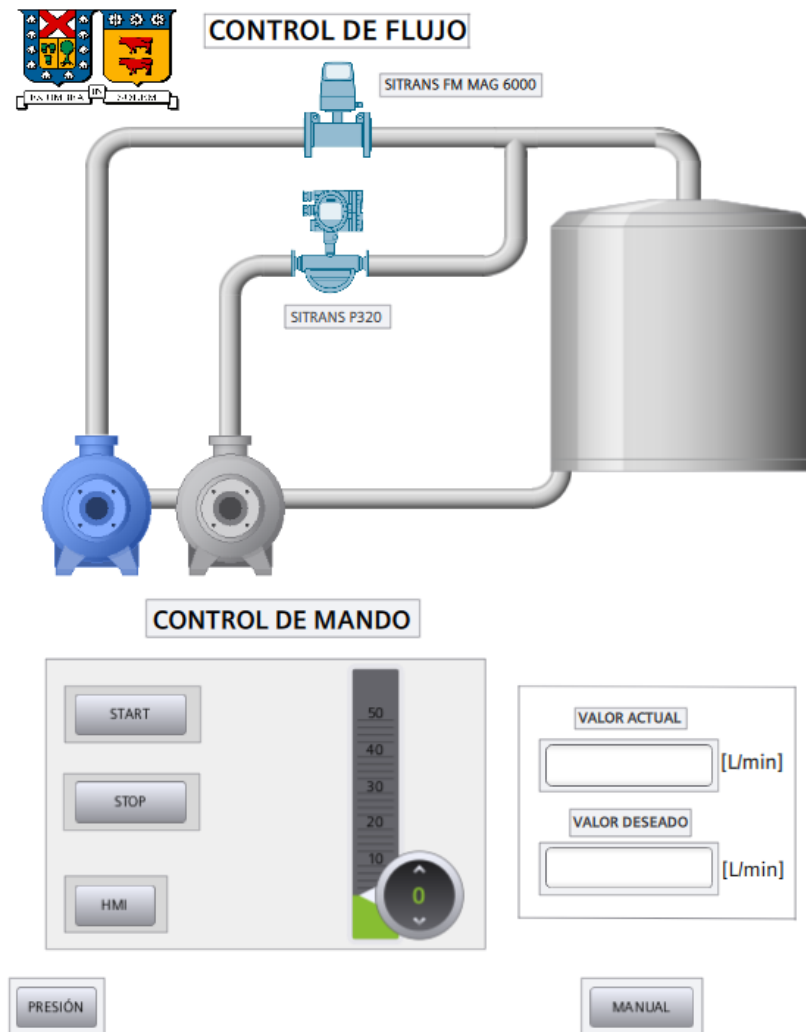


Figura 3.3: HMI Web Flujo

3.1.7. Integración de router inalámbrico para acceso remoto

La integración de un router es necesaria para habilitar la operación inalámbrica y extender la funcionalidad del servidor web integrado en el PLC Siemens S7-1500. Esta arquitectura de red, basada en WLAN/WiFi, permite que la HMI Web sea accesible desde cualquier dispositivo móvil o equipo conectado a la misma infraestructura. De esta manera, se habilita la supervisión y operación remota local (o in-situ) del sistema dentro del entorno de laboratorio, eliminando la dependencia de una conexión física directa al controlador y optimizando la operatividad.

Para la implementación en este entorno de prueba y desarrollo, se ha optado por un **router de uso doméstico**. Esta decisión se fundamenta en su óptima relación costo-disponibilidad y su capacidad suficiente para manejar el tráfico de datos requerido por la HMI Web en un escenario de carga limitada y supervisión local.

No obstante, es fundamental contrastar esta elección con los **routers industriales**. Estos equipos están específicamente diseñados para ambientes de planta reales y se distinguen por su alta fiabilidad, robustez (resistencia a vibraciones, temperatura y certificaciones IP) y la incorporación de características de seguridad avanzada (túneles VPN y firewall), las cuales son esenciales para la gestión remota segura y continua en entornos productivos.

1. Router Doméstico: Características y Justificación de Uso en el Proyecto.

La infraestructura del proyecto empleará un router WiFi de clase doméstica/consumo, seleccionado por su suficiencia técnica para establecer la red de área local inalámbrica (WLAN) requerida. Este equipo permite la comunicación entre el servidor web del PLC S7-1500 y los dispositivos clientes que acceden a la HMI Web en un entorno de laboratorio.



Figura 3.4: Router Utilizado

2. Características Generales

- Marca: TP-Link.
- Modelo: TL-WR720N.
- Frecuencia de operación: 2.4 GHz.
- Velocidad WiFi: 150 Mbps en 2.4 GHz.
- Puertos LAN: 2 puertos Ethernet RJ45 10/100 mbps.
- Métodos de cifrado: WPA2.
- Modos de operación: Router / Access Point.
- Multi-SSID: Hasta 4 redes inalámbricas distintas.
- Rango típico: 10–25 metros en interiores.

Nota: Aunque un router doméstico cumple sin problemas con los requerimientos de este proyecto académico, no es recomendado para ambientes industriales reales debido a la falta de robustez, aislación eléctrica, protección contra interferencias y fiabilidad a largo plazo.

3. Requerimientos de Red para la HMI Web del

a) Configuración de la Subred Local

- **Direccionamiento IP Estático del PLC:** Se requiere la asignación de una dirección IP estática al puerto PROFINET del PLC (ej. 192,168,0,10). Esto garantiza que el PLC, al actuar como servidor web, mantenga una dirección fija y predecible dentro de la subred local para facilitar el acceso constante por parte de los clientes.
- **Configuración del Router:** Es necesario asignar una dirección IP en la misma red que el PLC, asignando la primera (192,168,0,1), y crear una red inalámbrica que permita acceder desde otros dispositivos a la red.

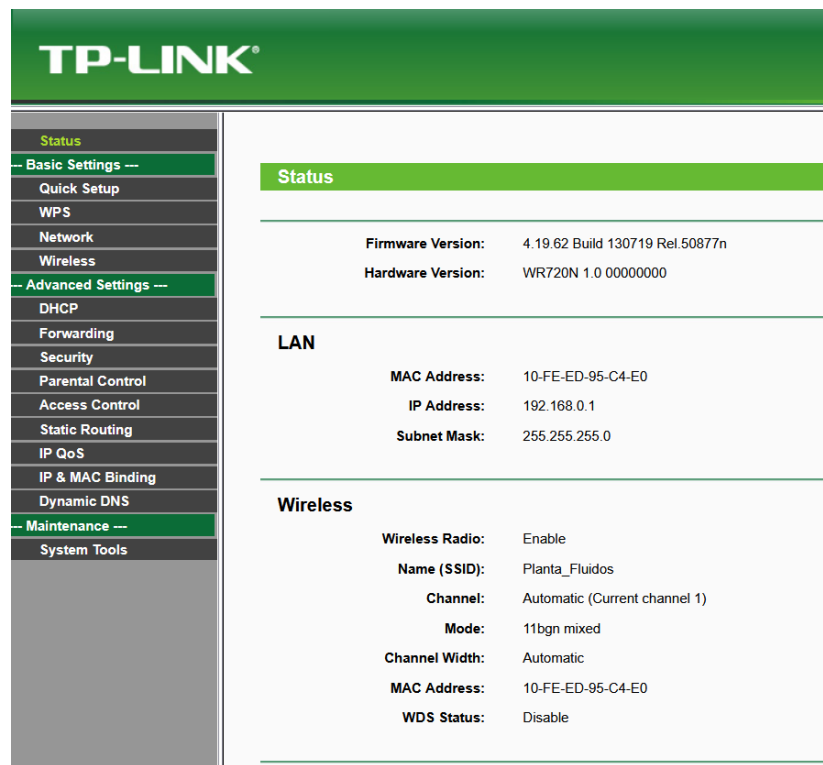


Figura 3.5: Configuración del Router

- **Conexión Física (PLC - Router):** El PLC debe ser conectado al router doméstico mediante un cable Ethernet a uno de sus puertos LAN. Esto establece el enlace físico necesario para integrar el controlador a la red de área local (LAN). También debe activarse la opción Usar Router.^{en} l configuración IPv4 del PLC (Figura 3.5)

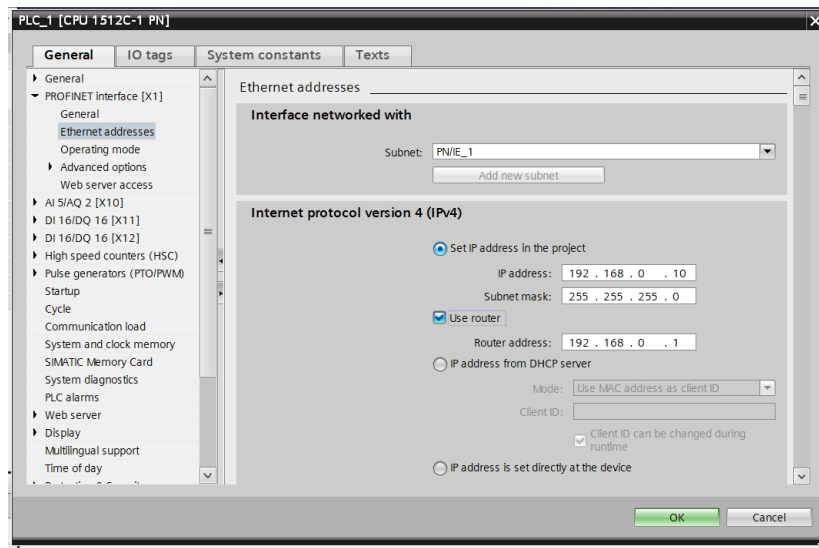


Figura 3.6: Configuración del PLC a Router

b) Acceso Cliente

- **Conectividad Inalámbrica (Clientes):** Los dispositivos clientes (PC, tableta o smartphone) deben estar conectados a la red WLAN/WiFi emitida por el router para garantizar que se encuentren en la misma subred lógica que el PLC, permitiendo la comunicación directa.

c) Requisitos del Servidor Web (PLC) y Cliente

- **Servidor Web Habilitado:** Es imprescindible que la funcionalidad de Servidor Web (WebServer / Unified Runtime) esté activada y configurada en el hardware del PLC (S7-1500) a través del entorno de programación (TIA Portal). Esta función es la que sirve la HMI Web a los clientes.
- **Compatibilidad del Navegador (HTML5):** Los dispositivos cliente deben utilizar un navegador web moderno que ofrezca soporte completo al estándar HTML5. Este estándar es el que utilizan las HMI Web de Siemens para el despliegue dinámico de la interfaz gráfica, asegurando la compatibilidad con navegadores comunes como Chrome, Edge, Firefox, y Safari

4. Routers industriales equivalentes para uso real en plantas

Router Industrial Siemens SCALANCE W744/W774

Fabricante: Siemens

Características principales:

- Acces Point / Cliente WiFi industrial.
- Alta resistencia ambiental (vibración, humedad, temperatura).
- Integración nativa con TIA Portal.
- Seguridad avanzada mediante WPA2 Enterprise.
- Alimentación 24 VDC y montaje en riel DIN.

Router Industrial MOXA AWK-3131A / AWK-1137C

Fabricante: MOXA

Características principales:

- WiFi de grado industrial banda dual.
- Certificaciones IEC 62443, EN50155 y UL.
- Alta inmunidad a interferencias EMI/EMC.
- Modos AP, Cliente y Repetidor.
- Rango de temperatura: -40°C a 70°C.

Router Industrial Phoenix Contact FL WLAN 5100/1100

Fabricante: Phoenix Contact

Características principales:

- Dispositivos de alta disponibilidad.
- Soporte para STP, VLAN, RADIUS y redundancia de red.
- Versiones IP65/IP67 para ambientes agresivos.
- Compatibilidad con PLCs de múltiples fabricantes.
- WiFi en bandas 2.4/5 GHz para mayor flexibilidad.

Router Industrial Hirschmann OWL LTE/WLAN Series

Fabricante: Hirschmann (Belden)

Características principales:

- WiFi industrial combinado con conectividad LTE.
- Firewall integrado y soporte para VPN.
- Opciones de doble radio para redundancia.
- Diseñado para operación crítica continua (24/7).
- Alta resistencia mecánica y térmica.

3.2. Pruebas y Validación del sistema

3.2.1. Validación de la comunicación entre equipos

La validación de la comunicación entre los distintos componentes del sistema constituye un paso fundamental para garantizar el funcionamiento coherente de los lazos de control y el correcto despliegue de información en la HMI Web. Dado que el sistema integra distintos entornos —un PLC físico, un simulador de procesos (Factory I/O), variadores de velocidad y un servidor web embebido— fue necesario verificar cada enlace de comunicación de manera independiente y posteriormente como sistema integrado.

- 1. Validación de la comunicación PLC – Factory I/O (PROFINET IO)** La comunicación entre el PLC Siemens S7-1500 y Factory I/O se implementó mediante PROFINET IO, configurando a Factory I/O como IO-Device y al PLC como IO-Controller.

Durante la validación se verificó:

- Reconocimiento correcto del dispositivo Factory I/O en la tabla de dispositivos PROFINET.
- Asignación exitosa del Device Name desde TIA Portal.
- Transferencia cíclica estable de datos entre las áreas de memoria configuradas (IW, QW).
- Correspondencia entre los valores generados por los sensores simulados (FT-100, PT-101, nivel) y las entradas recibidas por el PLC.
- Ausencia de retardos perceptibles en la comunicación.

- 2. Validación de la comunicación PLC – Variadores de Frecuencia (PROFINET / PROFIdrive)**

Los variadores de velocidad SINAMICS G120 (SY-100 y SY-101) se comunicaron con el PLC mediante PROFINET utilizando el Telegrama Estándar PROFIdrive (PZD 2/2).

Se validaron los siguientes aspectos:

- Recepción correcta de las palabras de estado (Status Word) del variador.
- Envío correcto de órdenes de control (Control Word) desde el PLC.
- Actualización de la referencia de velocidad en función de la señal de control (CO) generada por el PID Compact.
- Comportamiento estable ante cambios abruptos del CO.
- Acción del variador coherente con las dinámicas simuladas en Factory I/O.

- 3. Validación de la comunicación PLC – HMI Web (S7Comm / HTTP/HTTPS)**

El acceso a la HMI Web se realizó mediante el servidor integrado en el PLC, utilizando:

- HTTP/HTTPS para la entrega de la interfaz visual.
- S7 Communication (S7Comm) para la lectura y escritura de variables en tiempo real.

Las pruebas de validación confirmaron:

- Acceso correcto a la WebHMI desde distintos dispositivos dentro de la red inalámbrica.
- Actualización inmediata de las variables PV, SP y CO en la interfaz.
- Envío exitoso de comandos desde la HMI (PARTIR, PARAR, Control Manual, Control HMI).
- Correspondencia entre los valores visualizados y los almacenados en los DB del PLC.
- Baja latencia (¡100 ms) entre el cambio del proceso y la actualización visual en la HMI Web.

4. Validación de la comunicación mediante Router WLAN

El acceso inalámbrico fue gestionado mediante un router doméstico, funcionando como punto de acceso WiFi.

Se verificaron:

- Asignación de una dirección IP estática al PLC dentro de la subred creada.
- Estabilidad del enlace entre los dispositivos cliente y el PLC.
- Capacidad del router para manejar simultáneamente tráfico HTTP y S7Comm.
- Aislamiento del sistema dentro de la red local (sin acceso externo).
- Ausencia de pérdidas de paquetes durante sesiones prolongadas.

5. Validación integral del sistema

Finalmente, se ejecutaron pruebas del sistema completo, integrando:

- Lectura del proceso desde Factory I/O
- Procesamiento en el PLC
- Control mediante los bloques PID Compact
- Accionamiento del variador correspondiente
- Representación gráfica en la HMI Web

3.2.2. Respuesta dinámica del lazo de nivel

1. Respuesta ante cambios de Setpoint (SP)

Para analizar el desempeño del lazo de nivel, se aplicaron escalones de referencia (SP) en distintos puntos del rango operativo. Durante estas pruebas se registraron los parámetros dinámicos característicos:

- Tiempo de respuesta del sistema.
- Sobrepaso (overshoot) inicial.
- Tiempo de establecimiento (settling time).
- Error en estado estacionario (steady-state error).

Resultados obtenidos

- El sistema respondió de forma estable, sin oscilaciones sostenidas.
- El sobrepaso observado fue moderado, acorde al comportamiento típico de procesos de nivel.
- El tiempo de establecimiento fue adecuado para un proceso hidráulico de tipo integrador.
- Una vez alcanzado el régimen permanente, el error entre PV y SP fue prácticamente nulo, evidenciando una correcta acción integral del controlador.

El seguimiento en tiempo real del nivel medido (PV) mostró que el lazo mantiene un control preciso y coherente con el modelo hidráulico de Factory I/O.

2. Respuesta ante perturbaciones internas del proceso Se introdujeron perturbaciones simuladas en la dinámica del proceso, tales como:

- Alteración temporal del caudal de entrada.
- Variaciones abruptas del caudal de salida en el drenaje.
- Cambios momentáneos en la recirculación del estanque.

Comportamiento observado

- El PID Compact ajustó la salida de control (CO) de forma inmediata, incrementando o reduciendo la señal enviada al actuador virtual.
- El nivel retornó progresivamente al SP, demostrando una adecuada capacidad de rechazo de perturbaciones.
- No se observaron comportamientos inestables ni saturación prolongada del controlador.

Estas pruebas confirman que el lazo es capaz de mantener el nivel regulado incluso ante cambios bruscos en las condiciones del proceso.

En conclusión el lazo de nivel presenta un comportamiento dinámico estable, con un seguimiento adecuado del Setpoint y una respuesta efectiva ante perturbaciones internas. La interacción entre Factory I/O, el PLC S7-1500 y la HMI Web se comporta de manera consistente, permitiendo validar de forma completa la etapa de control automático del nivel.

3.2.3. Respuesta dinámica del lazo de flujo

1. **Respuesta ante cambios de Setpoint (SP)** La validación del lazo de flujo se realizó sometiendo el sistema a cambios tipo escalón en la consigna (Set Point) a través de todo el rango operativo. Este procedimiento permitió caracterizar la respuesta del controlador registrando parámetros clave como el tiempo de establecimiento, el sobrepaso (overshoot) y el error en estado estacionario.

- Tiempo de respuesta del sistema.
- Sobrepaso (overshoot) inicial.
- Tiempo de establecimiento (settling time).
- Error en estado estacionario (steady-state error).

Resultados obtenidos

- El lazo de flujo presentó un comportamiento estable ante todos los cambios de referencia, sin presencia de oscilaciones sostenidas.
 - El sobrepaso observado fue reducido, coherente con la dinámica propia del proceso de caudal.
 - El tiempo de establecimiento se mantuvo dentro de valores adecuados, evidenciando una correcta sintonización del controlador PID Compact.
 - En régimen permanente, el error entre PV y SP fue prácticamente nulo, lo que confirma una efectiva acción integral del controlador y la adecuada calibración del transmisor MET/flujo.
2. **Respuesta ante perturbaciones internas del proceso** Para validar la capacidad de rechazo de perturbaciones del lazo de flujo, se introdujeron variaciones controladas en la dinámica del proceso, entre ellas:
 - Apertura y cierre parcial de válvulas en la línea de recirculación.
 - Cambios abruptos en la restricción hidráulica del sistema.
 - Variación del nivel de succión del estanque principal, afectando la carga hidráulica.

Comportamiento observado

- El controlador PID Compact ajustó la salida de control (CO) de forma inmediata ante la detección de cambios en el flujo, incrementando o reduciendo la velocidad de la bomba según fuera necesario.

- El caudal retornó progresivamente al setpoint después de cada perturbación, evidenciando una adecuada capacidad de rechazo y estabilidad del sistema.
- No se observaron comportamientos inestables, saturación prolongada del actuador ni integrador acumulado, lo que confirma una correcta sintonización del lazo y una comunicación confiable PLC–variador mediante PROFINET.

El lazo de control de flujo presentó un desempeño estable y consistente, logrando seguir los cambios de referencia con tiempos de respuesta adecuados y un error permanente prácticamente nulo. La sintonización aplicada al PID Compact permitió mantener el caudal dentro de los rangos operativos sin generar oscilaciones ni saturaciones del actuador. Asimismo, el sistema evidenció una adecuada capacidad de rechazo frente a perturbaciones internas, validando la robustez del esquema de control y la correcta integración del transmisor de flujo, el variador y el PLC. Estos resultados confirman que el lazo de flujo se encuentra plenamente operativo y cumple con los requerimientos funcionales establecidos para la planta.

3.3. Conclusión

En conclusión, el proyecto logró la integración exitosa de una arquitectura de automatización moderna, comunicando efectivamente el PLC Siemens S7-1500, los variadores de frecuencia y la HMI web basada en WinCC Unified. Esta infraestructura permitió validar el funcionamiento de la planta y la lógica de control en la mayoría de sus variables.

Sin embargo, durante las pruebas de desempeño, se detectó una limitante física en el lazo de presión. Se evidenció una discrepancia entre el rango de medición del transmisor instalado y la capacidad operativa real de la planta, la cual no alcanza el umbral mínimo de lectura del sensor. Si bien esto impidió cerrar el lazo de control de presión en esta etapa, el diagnóstico permitió corroborar la importancia crítica del correcto dimensionamiento de la instrumentación de campo.

Desde una perspectiva académica, el proyecto deja instalada una plataforma robusta para la enseñanza de redes industriales y supervisión. Además, la situación del transmisor de presión se convierte en un caso de estudio valioso para futuros estudiantes sobre la selección de instrumentos y rangos de operación.

Finalmente, el proyecto cumple con los objetivos de diseño e ingeniería de software, entregando un sistema funcional y escalable, dejando claramente identificada la necesidad de recambio del sensor de presión como una mejora inmediata para alcanzar la operatividad total del proceso.

3.4. Recomendaciones

Como proyección del trabajo, se recomienda continuar ampliando la plataforma desarrollada, abordando mejoras en tres ejes fundamentales: infraestructura física, explotación académica y evolución tecnológica.

A nivel de infraestructura, se recomienda realizar una actualización mecánica e hidráulica que dote de mayor robustez a la planta. Esto implica revisar el dimensionamiento de las cañerías y la estanqueidad del tanque principal para asegurar que el proceso alcance los rangos operativos necesarios para una correcta implementación de los lazos de presión. Adicionalmente, se sugiere la incorporación de un segundo estanque interconectado. Esto permitiría configurar el sistema como un proceso de tanques acoplados, habilitando el estudio de dinámicas más complejas (sistemas de segundo orden) y estrategias de control multivariable.

Desde el ámbito académico, se sugiere aprovechar esta infraestructura mejorada para incorporar nuevas variables —como temperatura o presión diferencial— que enriquezcan la experiencia práctica. Asimismo, es fundamental elaborar guías de laboratorio estructuradas que permitan a los estudiantes abordar la planta con metodologías reales de diagnóstico, sintonización de controladores PID y evaluación de desempeño bajo perturbaciones.

En el ámbito industrial, se propone avanzar hacia la integración de protocolos de comuni-

cación modernos como OPC UA, MQTT o Modbus TCP. Esto abriría el sistema a aplicaciones de Industria 4.0, permitiendo la recolección de datos para IIoT, analítica y optimización energética. Complementariamente, la implementación de historización de variables y gestión avanzada de alarmas transformaría la plataforma en un banco de pruebas eficaz para validar estrategias de seguridad y operación remota antes de su despliegue en terreno.

Estas recomendaciones no surgen como carencias del diseño actual, sino como una hoja de ruta técnica que maximiza el valor de la inversión realizada, asegurando que la planta se mantenga como un recurso vigente, escalable y desafiante para las futuras generaciones de ingenieros.