

**Monitorización y control de un sistema de cavitación hidrodinámica a nivel de
laboratorio de la UIS.**

Jesse Solomon Blair Camacho

**Trabajo de grado para optar por el título de
Ingeniero Electrónico**

Director

Rodolfo Villamizar Mejia

Doctor en Tecnologías de la Información

Codirectora

Maria Mercedes Duarte Mantilla

MSc. Ingeniería Química

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Físico Mecánicas

Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones

Ingeniería Electrónica

Bucaramanga

2025

Tabla de Contenido

Introducción	6
Resumen.....	8
1 Objetivos.....	10
1.1 Objetivo General.....	10
1.2 Objetivos Específicos.....	10
2 Conceptos Previos.....	11
2.1 Cavitación Hidrodinámica	11
2.2 Controlador Lógico Programable (PLC)	13
2.3 Interfaz Hombre-Máquina	15
2.4 TIA Portal (Totally Integrated Automation Portal)	16
2.5 Norma ISA 95	17
3 Desarrollo de la solución	20
3.1 Revisión bibliográfica.....	20
3.2 Evaluación inicial del sistema.....	21
3.3 Verificación del funcionamiento de los instrumentos del equipo.....	24
3.4 Mantenimiento y reparación de los dispositivos del equipo.....	25
3.5 Diseño del sistema de automatización	27
3.6 Desarrollo de la lógica de control	34
3.6.1 Definición del "Main Block" (Bloque Principal).....	35
3.6.2 Programación de las secuencias de control.....	35
3.6.3 Implementación de las acciones del proceso.	35
3.6.4 Lógica individual de los dispositivos.....	36
3.7 Conexión de los instrumentos y el PLC.....	37
3.7.1 Diseño de la conexión de los dispositivos	37
3.7.2 Adquisición de materiales y componentes.....	38
3.7.3 Pruebas individuales de conexión.....	39
3.7.4 Integración del sistema	39
3.8 Diseño e Implementación de la HMI	42
3.8.1 Estructura de la HMI.....	42
3.8.2 Pantalla principal	43
3.8.3 Pantallas emergentes.....	43
3.8.4 Interconexión con el PLC	45
4 Integración y pruebas del sistema.....	46
4.1 Verificación inicial del sistema de control.....	46
4.2 Prueba de llenado de tanques y premezcla	46
4.3 Evaluación del sistema de bombeo	47
4.4 Validación del sensor de caudal y comportamiento del flujo.....	47

MONITORIZACIÓN Y CONTROL DE CAVITACIÓN

3

4.5	Comprobación de sensores de presión	47
4.6	Prueba final del sistema completo	48
5	Conclusiones	51
6	Recomendaciones	53
	Referencias Bibliográficas	55
	Apéndices.....	57

Lista de Tablas

Tabla 1. Distribución de los dispositivos en el sistema 40

Lista de Figuras

Figura 1. Proceso de cavitación hidrodinámica en un tubo Venturi.....	12
Figura 2. Esquema de cavitador hidrodinámico con rotor y estator	13
Figura 3. Controlador Lógico Programable (PLC).....	14
Figura 4. Interfaz Hombre-Máquina.....	15
Figura 5. Totally Integrated Automation Portal (TIA Portal).....	17
Figura 6. Pirámide de Automatización Industrial ISA-95	19
Figura 7. Estructura física del sistema de cavitación hidrodinámica.....	22
Figura 8. Diagrama inicial del Sistema de automatización del equipo de cavitación hidrodinámica.	23
Figura 9. Dispositivos del sistema para pruebas de funcionamiento.....	24
Figura 10. Proceso de limpieza de tanques de almacenamiento.....	25
Figura 11. Base renovada con los dispositivos reinstalados.....	26
Figura 12. Diagrama GRAFCET del Sistema de automatización	28
Figura 13. PLC Siemens S7-1500 CPU1512C-PN.....	30
Figura 14. Sensor de Presión	32
Figura 15. Sensor de caudal.....	32
Figura 16. Sistema de automatización del sistema de cavitación hidrodinámica.....	33
Figura 17. Diagrama P&ID del sistema de cavitación hidrodinámica.	34
Figura 18. Estructura de bloques de la lógica de control del sistema.....	37
Figura 19. Componentes adicionales del sistema.	38
Figura 20. Montaje de conexionado final	41
Figura 21. Diseño HMI.....	45
Figura 22. Registro de variables de caudal y presión.	48
Figura 23. Resultados pruebas de funcionamiento	49

Introducción

El agua es un recurso vital para las comunidades y el medio ambiente, pero su calidad se ve amenazada por la contaminación y el uso insostenible. En este contexto, surge la necesidad de desarrollar tecnologías avanzadas para el tratamiento y conservación de este recurso, y una de las soluciones innovadoras es la cavitación hidrodinámica. Este fenómeno permite generar burbujas de vapor en fluidos mediante caídas controladas de presión y, al colapsar, estas burbujas liberan energía que puede aprovecharse para diversos procesos industriales y ambientales (Ranade, Bhandari, & Nagarajan, 2022). La Universidad Industrial de Santander (UIS) cuenta con un sistema de cavitación hidrodinámica que es una infraestructura con gran potencial de aplicación en tratamiento de aguas, pero enfrenta una problemática significativa: actualmente se encuentra en desuso debido a la falta de modernización. No obstante, este sistema posee un alto potencial como herramienta para la investigación y la enseñanza, siempre que se actualice tecnológicamente, ya que su prolongado periodo de inactividad ha comprometido su funcionalidad.

La automatización y el monitoreo remoto son esenciales en cualquier entorno industrial o académico que busque optimización y precisión en el registro de datos. A nivel global, la transformación digital y la adopción de sistemas automatizados han revolucionado diversos sectores productivos, permitiendo una gestión precisa y en tiempo real de procesos complejos (Manesis & Nikolakopoulos, 2018). En este contexto, se propone el diseño e implementación de un sistema de monitoreo y automatización para el sistema de cavitación hidrodinámica desarrollado en la UIS, con el propósito de modernizar su operación conforme a los estándares

internacionales de automatización industrial, específicamente la norma ISA-95 (International Society of Automación).

Uno de los mayores retos de este proyecto radica en optimizar el uso de la infraestructura existente, respetando las limitaciones de espacio y la compatibilidad de los instrumentos actuales. Sin embargo, al integrar la automatización, se permite una gestión eficiente del proceso, aumentando la funcionalidad del sistema. La implementación de un Controlador Lógico Programable (PLC) para la automatización de los elementos del sistema, junto con una interfaz gráfica (HMI) para su visualización, facilita el monitoreo en tiempo real y el ajuste dinámico de las variables involucradas en el fenómeno de cavitación hidrodinámica. Esto no solo mejora el análisis y comprensión del fenómeno en entornos controlados, sino que también proporcionará a estudiantes y profesionales la oportunidad de realizar una experiencia práctica con tecnologías avanzadas.

Además, la posibilidad de manipular y monitorear un sistema de cavitación hidrodinámica mediante una plataforma automatizada puede abrir nuevas puertas en la investigación experimental. Esto permite a los estudiantes observar y analizar las dinámicas de cavitación con un nivel de precisión mayor, incrementando así el valor de las investigaciones realizadas en la universidad y fortaleciendo su capacidad para competir en el ámbito académico y tecnológico.

Por tanto, mediante el desarrollo del presente trabajo de grado se buscó adaptar y reacondicionar tecnológicamente el sistema de cavitación, cuya principal deficiencia es el sistema de monitorización y control. Con este enfoque, no solo se permitirá el monitoreo de las variables clave, sino que se asegurará que el sistema esté adaptado a las demandas tecnológicas actuales.

Resumen

Título: Monitorización y control de un sistema de cavitación hidrodinámica a nivel de laboratorio de la UIS*

Autor: Jesse Solomon Blair Camacho**

Palabras Clave: automatización, cavitación hidrodinámica, monitoreo.

Descripción:

La cavitación hidrodinámica es una tecnología emergente con aplicaciones en el tratamiento de aguas residuales y en procesos químicos avanzados. Su principio de funcionamiento se basa en la formación, crecimiento y colapso de microburbujas en un fluido, generando condiciones extremas de presión y temperatura que favorecen reacciones químicas y procesos de degradación.

En la Universidad Industrial de Santander, se disponía de un dispositivo de cavitación hidrodinámica para estudios experimentales. Sin embargo, la falta de automatización y control restringía su operatividad, y el equipo permaneció inactivo por un largo período, lo que dificultaba su uso en investigaciones. La ausencia de un sistema de monitoreo y su manejo manual impedían la recopilación de datos precisos y la optimización del proceso, reduciendo su eficiencia y limitando su aplicabilidad.

Para abordar esta problemática, se diseñó e implementó un sistema automatizado basado en un Controlador Lógico Programable (PLC), complementado con sensores y actuadores que permitieron la supervisión remota mediante una Interfaz Hombre-Máquina (HMI). Este sistema garantizó un control preciso de variables clave como nivel, presión y caudal, mejorando el desempeño y la estabilidad del proceso.

Como resultado, se obtuvo un sistema completamente funcional y automatizado, lo que mejoró la operatividad del dispositivo y permitió la recopilación de datos en tiempo real. La implementación de esta solución fortalecerá la investigación en cavitación hidrodinámica en la Universidad Industrial de Santander, favoreciendo su aplicación en entornos académicos e industriales.

* Trabajo de Grado

** Facultad de Ingenierías Físico Mecánicas. Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones. Director: Rodolfo Villamizar Mejía. Doctor en tecnologías de información. Codirector: Maria Mercedes Duarte Mantilla. MSc. Ingeniería Química.

Abstract

Title: Monitoring and Control of a Hydrodynamic Cavitation System at the Laboratory Level of UIS*

Author: Jesse Solomon Blair Camacho**

Keywords: automation, hydrodynamic cavitation, monitoring.

Description:

Hydrodynamic cavitation is an emerging technology with applications in wastewater treatment and advanced chemical processes. Its operating principle is based on the formation, growth, and collapse of microbubbles within a fluid, generating extreme pressure and temperature conditions that enhance chemical reactions and degradation processes.

At the Industrial University of Santander, a hydrodynamic cavitation device was available for experimental studies. However, the lack of automation and control limited its operability, and the equipment remained inactive for an extended period, hindering its use in research activities. The absence of a monitoring system and its manual operation prevented the collection of accurate data and the optimization of the process, reducing its efficiency and limiting its applicability.

To address this issue, an automated control system was designed and implemented based on a Programmable Logic Controller (PLC), complemented by sensors and actuators that enabled remote supervision through a Human-Machine Interface (HMI). This system ensured precise control of key variables such as level, pressure, and flow, thereby improving the performance and stability of the process.

As a result, a fully functional and automated system was achieved, improving the device's operability and enabling real-time data collection. The implementation of this solution will strengthen research in hydrodynamic cavitation at the Industrial University of Santander, supporting its application in both academic and industrial settings.

* Degree Work

** Facultad de Ingenierías Físico Mecánicas. Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones. Director: Rodolfo Villamizar Mejía. Doctor en tecnologías de información. Codirector: Maria Mercedes Duarte Mantilla. MSc. Ingeniería Química.

1 Objetivos

1.1 Objetivo General

Monitorizar y controlar un sistema de cavitación hidrodinámica a nivel de laboratorio de la UIS, a partir de su infraestructura existente, considerando la capacidad de los instrumentos actuales, la compatibilidad de la infraestructura previa y las limitaciones de espacio que se requieran para visualizar y controlar el proceso desde una interfaz HMI.

1.2 Objetivos Específicos

- Establecer la condición actual de funcionamiento eléctrico y electrónico del sistema de cavitación hidrodinámica, evaluando los componentes existentes para determinar las necesidades de reparación o sustitución.
- Definir los requisitos de monitoreo y control del sistema de cavitación hidrodinámica, diseñando posteriormente la arquitectura del sistema, que incluirá el control automatizado mediante PLC y una interfaz gráfica (HMI).
- Seleccionar y diseñar el sistema de monitoreo y control, validando experimentalmente su funcionamiento y asegurando su eficiencia operativa en tiempo real.
- Documentar el proceso de instalación y uso del sistema, incluyendo manuales técnicos y de operación.

2 Conceptos Previos

2.1 Cavitación Hidrodinámica

La cavitación hidrodinámica es un fenómeno en el que se generan, crecen y colapsan burbujas de gas en un líquido debido a cambios dinámicos de presión. Cuando la presión del fluido cae por debajo de su presión de vapor, se forman cavidades o burbujas de vapor, que pueden originarse por nucleación homogénea (pequeñas fluctuaciones moleculares en ausencia de impurezas) o nucleación heterogénea (cuando partículas suspendidas o gases disueltos actúan como núcleos de formación).

El colapso de estas burbujas genera efectos físicos y químicos intensos, como chorros de alta velocidad, elevadas temperaturas y la formación de radicales hidroxilos. Estos efectos han despertado un gran interés en diversas aplicaciones industriales y científicas, especialmente en el tratamiento de aguas, procesos químicos y mejoras en la eficiencia energética. (Ranade, Bhandari, & Nagarajan, 2022).

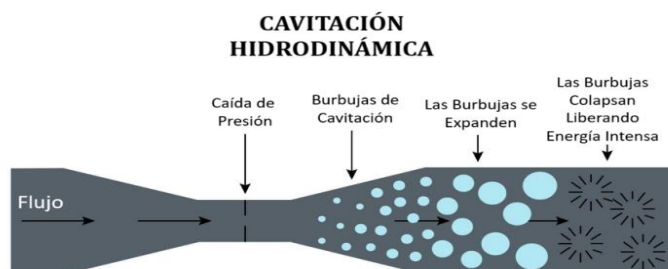
Existen distintos tipos de cavitación, entre ellos la cavitación óptica, de partículas, acústica e hidrodinámica. A diferencia de la cavitación acústica, que emplea ultrasonidos para inducir el colapso de burbujas, la cavitación hidrodinámica se genera al hacer pasar un fluido a través de dispositivos diseñados para crear zonas de baja presión, como venturís, orificios y turbinas (ver figura 1 y 2), por tanto, este tipo de cavitación es más escalable y eficiente en aplicaciones industriales.

En las últimas décadas, el interés por la cavitación hidrodinámica ha crecido debido a su potencial en diversas industrias, desde el tratamiento avanzado de aguas y la refinación de

combustibles, hasta la intensificación de procesos químicos y la mejora en la extracción de compuestos bioactivos.

Figura 1.

Proceso de cavitación hidrodinámica en un tubo Venturi



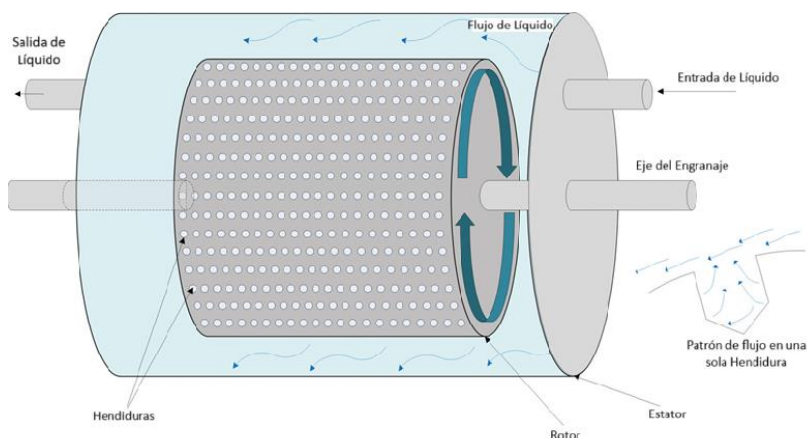
Nota. La imagen muestra las etapas del proceso de cavitación hidrodinámica: el flujo líquido experimenta una caída de presión al pasar por una zona de estrechamiento, lo que provoca la formación de burbujas de cavitación. Estas burbujas se expanden y colapsan en la zona de recuperación, liberando energía en forma de microchoques. Esta representación permite visualizar el principio físico fundamental del fenómeno de cavitación inducida por velocidad y presión.

Adaptado de *Hydrodynamic Cavitation*, por Voltek Water, s. f. 2022.

<https://www.voltekwater.com/hydrodynamic-cavitation>

Figura 2.

Esquema de cavitador hidrodinámico con rotor y estator



Nota. La figura representa un sistema de cavitación hidrodinámica basado en un diseño de rotor-estator con hendiduras. Este proceso mecánico permite homogeneizar fluidos y generar cavitación de forma controlada, mejorando la eficiencia de reacciones químicas. Su uso en aplicaciones como el tratamiento de crudos pesados permite reducir la necesidad de aditivos, favoreciendo procesos más sostenibles y eficientes. Adaptado de *Helping Heavy Crudes Go the Distance*, por Southwest Research Institute (SwRI), 2016.

<https://www.swri.org/newsroom/technology-today/helping-heavy-crudes-go-the-distance>

2.2 Controlador Lógico Programable (PLC)

Los Controladores Lógicos Programables (PLC, Programmable Logic Controller) son dispositivos electrónicos digitales diseñados para automatizar procesos industriales. Se caracterizan por contar con un microcontrolador y una memoria programable, lo que les permite ejecutar instrucciones para controlar maquinaria y procesos mediante entradas y salidas digitales o analógicas. El PLC está diseñado para interactuar con el entorno industrial, recibiendo datos de

sensores y controlando actuadores como motores, válvulas y luces indicadoras. (Manesis & Nikolakopoulos, 2018).

Hoy en día, los PLC varían en complejidad y tamaño, con múltiples extensiones e interfaces que les permiten comunicarse con otros dispositivos y sistemas industriales. Además, existen diversos lenguajes de programación, como Ladder Diagram (LD), Structured Text (ST) y Function Block Diagram (FBD), que facilitan su configuración según las necesidades del usuario.

Figura 3.

Controlador Lógico Programable (PLC).



Nota. Adaptado de *PLC là gì? Đặc điểm và công dụng đặc biệt và nổi bật của PLC*, por LiOA, s. f., 2022.

<https://nhatlinhlio.com.vn/plc-la-gi/>

2.3 Interfaz Hombre-Máquina

La Interfaz Hombre-Máquina (HMI, Human-Machine Interface) es el medio de interacción entre los humanos y máquinas (sistemas industriales automatizados). Su función principal es la visualización de datos operativos adquiridos por sensores y la recepción de comandos para regular procesos o maquinaria.

Una HMI está compuesta por hardware (como pantallas táctiles, paneles de control y computadoras industriales) y software especializado que permite la comunicación con dispositivos de control, como los Controladores Lógicos Programables (PLC). Gracias a esta interfaz, es posible monitorear en tiempo real el estado del proceso, ajustar parámetros operativos y detectar fallos en función de las variables del sistema, optimizando así la gestión y supervisión de la producción. (Huang & Chen, 2023).

Dependiendo de su implementación, una HMI puede utilizarse únicamente para supervisión o para la ejecución de acciones más complejas, como la configuración de ajustes de control. Su integración ha eliminado la necesidad de comunicación manual, optimizado la toma de decisiones y mejorado la eficiencia y seguridad en entornos industriales.

Figura 4.

Interfaz Hombre-Máquina



Nota: Adaptado de *Interfaz Hombre-Máquina (HMI)*, por Grupo SYZ, s. f., 2022

<https://grupo-syz.com/todos-los-productos/automatizacion/inferfaz-hombre-maquina-hmi/>

2.4 TIA Portal (Totally Integrated Automation Portal)

El Totally Integrated Automation Portal (TIA Portal) es un entorno de desarrollo integrado desarrollado por Siemens para la configuración, programación, monitoreo y diagnóstico de sistemas de automatización industrial. Este software permite la gestión centralizada de Controladores Lógicos Programables (PLC), interfaces Hombre-Máquina (HMI), sistemas de accionamiento (drives), redes industriales y dispositivos periféricos, facilitando la integración de todos los componentes en un único entorno de trabajo. (Gútiez, 2023).

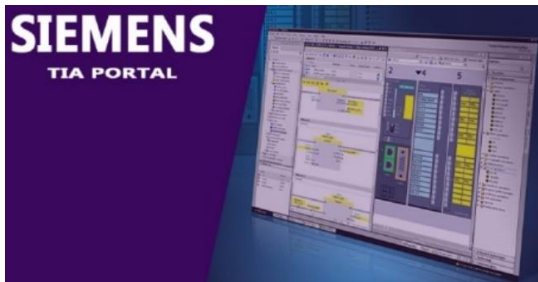
TIA Portal se basa en una arquitectura modular que agrupa diversas herramientas especializadas, entre las que destacan:

- STEP 7: Plataforma para la programación de PLC de la serie SIMATIC S7-1200, S7-1500, S7-300 y S7-400, compatible con lenguajes estándar IEC 61131-3, como Ladder (LD), Texto estructurado (ST) y Function Block Diagram (FBD).
- WinCC: Software de desarrollo de Interfaz Hombre-Máquina (HMI) para la supervisión y control de procesos industriales en tiempo real.
- Startdrive: Herramienta para la configuración y diagnóstico de accionamientos SINAMICS, como variadores de frecuencia y servomotores.
- SIMATIC Safety: Módulo para la programación de sistemas de seguridad funcional en PLC y redes industriales.

La implementación de TIA Portal en la industria ha permitido la optimización de procesos, reducción de tiempos de ingeniería y una mayor conectividad entre dispositivos gracias a la compatibilidad con protocolos de comunicación como PROFINET, PROFIBUS y OPC UA. Además, su integración con herramientas de simulación y diagnóstico facilita la depuración de errores antes de la puesta en marcha de un sistema.

Figura 5.

Totally Integrated Automation Portal (TIA Portal)



Nota: Adaptado de *Siemens TIA Portal Tutorial*, por Simenteknindo, s. f.

<https://simenteknindo.com/news/siemens-tia-portal-tutorial/>

2.5 Norma ISA 95

La norma ISA-95, también conocida como ANSI/ISA-95 o IEC 62264, es un estándar internacional diseñado para la integración de los sistemas de logística con los sistemas de automatización de manufactura. Su objetivo principal es organizar la tecnología y los procesos empresariales en diferentes niveles, definidos según las actividades que se realizan en cada uno de ellos, permitiendo una comunicación eficiente entre estos niveles.

Esta normativa se basa en el Modelo de Referencia Purdue para la manufactura integrada por computadoras, el cual define la segmentación de redes en los sistemas de automatización industrial. La arquitectura propuesta por ISA-95 es ampliamente utilizada en la industria moderna,

ya que proporciona un marco de referencia aplicable a diversas tecnologías y sectores, incluyendo la manufactura discreta, continua y logística. (Automation, 2025).

ISA-95 se estructura en cinco niveles principales que inicia en el nivel 0 y finaliza en el 4 (ver figura 6):

- **Nivel 0.** Define los procesos físicos reales. Aquí se encuentran los sensores, dispositivos y equipos físicos que interactúan directamente con el proceso de producción físico. Estos componentes recolectan datos y controlan aspectos fundamentales del proceso.
- **Nivel 1.** En este nivel, se encuentran los PLC (Controladores Lógicos Programables), que se encargan de recibir señales de los sensores y dispositivos, procesarlas y enviar comandos de control para manipular el proceso de producción.
- **Nivel 2.** Se encarga de la supervisión y el control de los procesos físicos, generalmente a través de sistemas SCADA y DCS.
- **Nivel 3.** Define las actividades del flujo de trabajo necesarias para obtener los productos finales deseados, incluyendo la planificación y ejecución de la producción.
- **Nivel 4.** Se relaciona con la gestión empresarial, abarcando actividades como planificación de la producción, gestión de inventarios y cumplimiento de pedidos.

Gracias a esta estructura jerárquica, la norma ISA-95 facilita la interoperabilidad entre los diferentes niveles de un sistema de manufactura, asegurando una integración eficiente entre los procesos operativos y los sistemas de gestión empresarial.

Figura 6.

Pirámide de Automatización Industrial ISA-95



Nota. La imagen muestra la Pirámide de Automatización Industrial ISA-95, que describe cómo los diferentes niveles de sistemas industriales se interconectan para mejorar la integración entre la planta y los sistemas empresariales. Adaptado de *ISA 95: por qué los sistemas MES necesitan cumplir esta norma*, por MES Automation, s. f. <https://mesautomation.com/isa-95/>

3 Desarrollo de la solución

La implementación de un sistema automatizado requiere un enfoque estructurado que garantice su funcionalidad, eficiencia y escalabilidad. Para llevar a cabo la monitorización y control del sistema de cavitación hidrodinámica en la UIS, se siguió un proceso de desarrollo dividido en varias fases, abarcando desde la evaluación inicial del estado del sistema hasta la integración completa de su infraestructura de control.

El desarrollo se organizó en etapas clave, cada una orientada a abordar un aspecto específico de la solución:

3.1 Revisión bibliográfica

Para establecer una base teórica sólida del proyecto, se llevó a cabo una investigación documental sobre los conceptos a trabajar en el proceso. Como punto de partida, se realizó un análisis detallado del documento original del proyecto, en el cual se describió la estructura y funcionamiento del sistema de cavitación hidrodinámica. Esta revisión permitió identificar los principios de diseño utilizados y los componentes clave del sistema.

Además de la información inicial, se consultaron referencias especializadas sobre cavitación hidrodinámica, automatización de procesos industriales y control mediante PLC. A partir de esta revisión, se identificaron los requerimientos operativos, como las condiciones necesarias de las variables críticas para asegurar el funcionamiento adecuado del proceso, y los aspectos fundamentales para su monitoreo y control. De esta manera, se analizaron diversas fichas técnicas para determinar los elementos más adecuados que garantizaran la confiabilidad y

estabilidad del sistema. Además, se consideraron estándares industriales relevantes, entre ellos la norma ISA-95, la cual establece un modelo jerárquico para la integración de sistemas de automatización y gestión en entornos industriales. La aplicación de este estándar permitió estructurar de manera eficiente la comunicación entre el PLC y la HMI, asegurando una integración óptima de la automatización con los niveles de supervisión del sistema.

Esta etapa también incluyó la revisión de estudios previos sobre el desarrollo de interfaces HMI en sistemas similares, lo que permitió definir principios de diseño enfocados en la eficiencia operativa y la facilidad de interacción con el usuario.

3.2 Evaluación inicial del sistema

Para comprender el estado actual del sistema de cavitación hidrodinámica y definir los requerimientos necesarios para su modernización, se llevó a cabo una revisión exhaustiva del equipo existente (ver Figura 7). Esta evaluación permitió analizar la estructura general del sistema, identificar sus principales componentes e inspeccionar la condición en la que se encontraban los dispositivos instalados.

En primer lugar, se examinó físicamente el equipo con el fin de conocer su disposición y los elementos que lo conforman. Se identificaron componentes esenciales como tanques de almacenamiento, tuberías de conexión, sensores de nivel, electroválvulas, una bomba, un agitador, un motor monofásico, el tablero de control y el reactor de ondas de choque (SPR). Se observó que, si bien la infraestructura general se mantenía intacta, algunos elementos presentaban signos de desgaste, acumulación de residuos y posibles fallas debido al tiempo de inactividad.

Figura 7.

Estructura física del sistema de cavitación hidrodinámica.

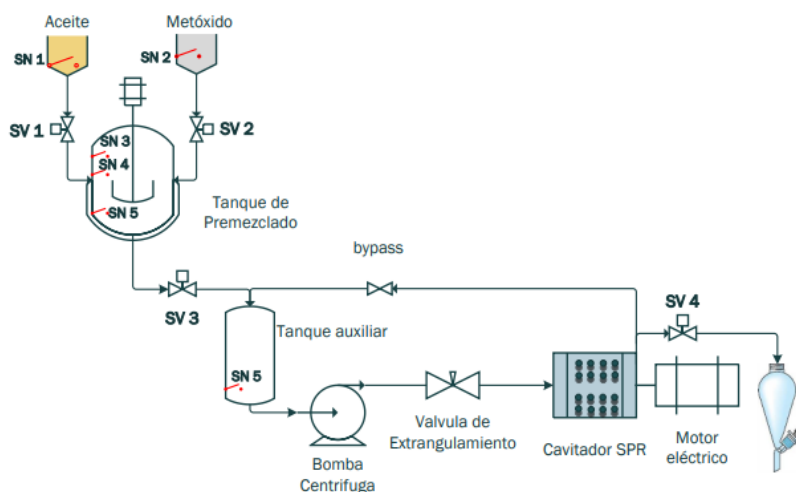


Nota. En la imagen se observa disposición inicial del equipo, incluyendo sus principales componentes estructurales.

Además del análisis físico, se revisó la documentación técnica disponible para comprender la lógica de operación del sistema. Dentro de esta revisión, se analizó el esquema existente en el documento guía (Herreño & Rozo, 2016), el cual representa la organización y funcionamiento del Sistema de automatización (ver Figura 8), identificando la interacción entre sus distintos componentes y las señales necesarias para su automatización.

Figura 8.

Diagrama inicial del Sistema de automatización del equipo de cavitación hidrodinámica.



Nota. El diagrama representa organización del Sistema de automatización, detallando la interacción entre sus componentes. Rodríguez Herreño & Vera Roza, 2016.

Durante la inspección, se verificó la integridad de los dispositivos y la estructura, identificando fallas que podrían afectar el desempeño del sistema. Entre los principales hallazgos, se determinó la necesidad de reemplazar las tuberías debido a la contaminación química, realizar limpieza y verificación de funcionamiento de los dispositivos y reforzar la estructura base para mejorar su estabilidad. Además, se identificaron componentes que requerían sustitución para garantizar la operatividad del sistema.

Esta evaluación inicial permitió establecer una base clara para la planificación de la automatización del sistema, asegurando que los componentes existentes pudieran integrarse de manera eficiente en el nuevo esquema de control. Asimismo, los hallazgos obtenidos sirvieron

como punto de partida para la siguiente etapa, enfocada en la verificación del funcionamiento de los instrumentos y la implementación de estrategias para optimizar su desempeño dentro del proceso.

3.3 Verificación del funcionamiento de los instrumentos del equipo

Para evaluar el estado operativo de los dispositivos, se realizó una verificación individual mediante pruebas eléctricas y electrónicas. En esta etapa, se desmontaron y probaron el motor monofásico, el motor del agitador, los sensores de nivel, la bomba y las servoválvulas, asegurando que cada componente respondiera correctamente a los estímulos eléctricos y mecánicos. La Figura 9 muestra un conjunto de imágenes representativas de las pruebas realizadas a los distintos dispositivos, en las cuales se evidencia las condiciones en las que se encontraban los componentes al momento de la inspección.

Figura 9.

Dispositivos del sistema para pruebas de funcionamiento.



Nota. Se realizaron pruebas eléctricas y electrónicas a cada dispositivo para comprobar su operatividad antes de la integración al Sistema de automatización.

Los resultados indicaron que todos los dispositivos funcionaban de manera adecuada dentro de sus parámetros operativos, sin presentar fallas evidentes en su desempeño. No obstante, más adelante, durante la implementación del Sistema de automatización, se identificaron inconvenientes con las servoválvulas en su integración con el PLC, lo que llevó a su posterior reemplazo. Sin embargo, en esta fase inicial de verificación, estos dispositivos respondieron correctamente a las pruebas individuales.

3.4 Mantenimiento y reparación de los dispositivos del equipo

Para garantizar la correcta operación y seguridad del sistema de cavitación hidrodinámica, se llevó a cabo un proceso de mantenimiento y reparación de los dispositivos y componentes estructurales (Tanques, tubería, etc). Esta etapa tuvo como objetivo corregir deficiencias identificadas en la evaluación inicial y asegurar la óptima integración de los elementos dentro del Sistema de automatización.

En cuanto a los dispositivos eléctricos y electrónicos, como motores, sensores, servoválvulas, etc., se determinó que su funcionamiento era adecuado, por lo que solo se les realizó una limpieza para eliminar residuos acumulados y evitar posibles interferencias en su desempeño.

Por otro lado, los tanques de almacenamiento fueron desmontados y sometidos a un proceso de limpieza (ver Figura 10), debido a la presencia de residuos químicos adheridos desde su uso previo. De manera similar, se llevó a cabo la sustitución completa de las tuberías del sistema, ya que estas se encontraban contaminadas con los químicos empleados anteriormente, lo que podría afectar la calidad y seguridad del proceso de cavitación.

Figura 10.

Proceso de limpieza de tanques de almacenamiento

Nota. se realizó una limpieza profunda de los tanques de almacenamiento para eliminar los residuos químicos adheridos debido a su uso anterior, asegurando su adecuada reutilización dentro del sistema.

A nivel estructural, se realizaron mejoras en la base del sistema. La madera que servía como sostenimiento de algunos dispositivos fue reemplazada por una de mayor resistencia, lo que proporcionó una mejor estabilidad. Además, se efectuó un proceso de soldadura y pintura en las partes metálicas de la estructura, reforzando su firmeza y durabilidad. También se cambió el tablero de control, ya que el anterior presentaba un estado de deterioro que comprometía su funcionalidad y seguridad.

Finalmente, el reactor de ondas de choque (SPR) fue sometido a mantenimiento correctivo, con la sustitución de algunos de sus componentes esenciales para garantizar su óptimo desempeño en el proceso de cavitación.

Figura 11.

Base renovada con los dispositivos reinstalados.



Nota. Se reemplazó la base de madera, se soldaron y pintaron las partes metálicas, y se reinstalaron los dispositivos en su posición final para mejorar la estabilidad y funcionalidad del sistema.

Estas acciones permitieron que el sistema quedara en condiciones óptimas para su automatización y puesta en marcha, asegurando la fiabilidad de los dispositivos y la estabilidad de la infraestructura.

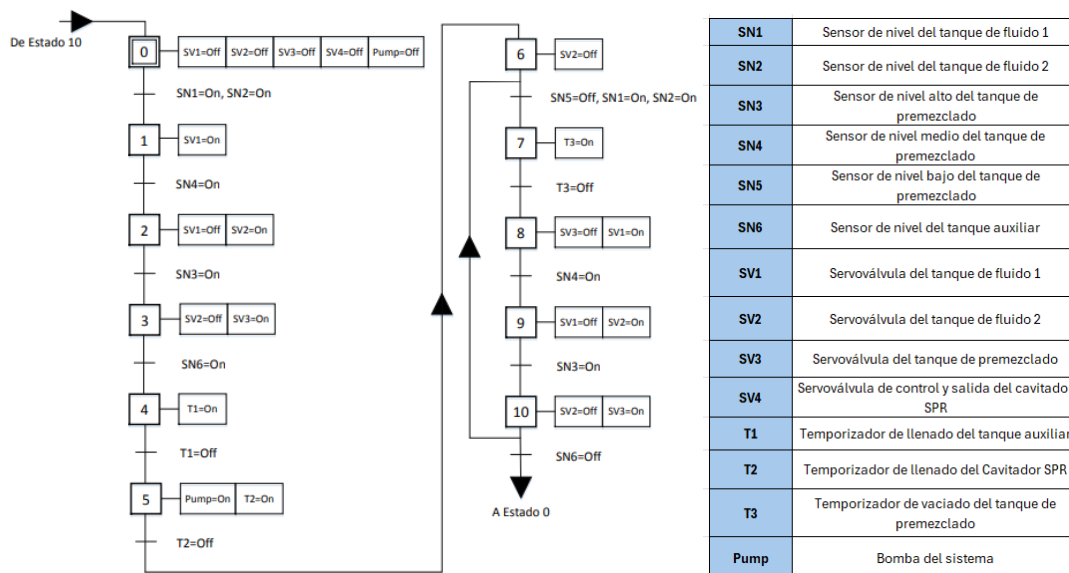
3.5 Diseño del sistema de automatización

Para el diseño del sistema de automatización, se tomó como referencia el documento original del proyecto (Herreño & Rozo, 2016)., en el cual ya se había definido una estructura previa del sistema basado en un microcontrolador Arduino. En este documento se incluyó un diagrama

GRAFSET (ver Figura 12) que describe la secuencia automatizada del proceso, estableciendo las condiciones para la operación de los dispositivos del proceso.

Figura 12.

Diagrama GRAFCET del Sistema de automatización



Nota. Se presenta el diagrama GRAFCET con sus respectivas siglas, donde se detalla la secuencia operativa del sistema y las transiciones entre sus estados. Rodríguez Herreño & Vera Rozo, 2016.

En esta secuencia, el sistema debía verificar la disponibilidad de fluidos en los tanques de almacenamiento para luego transferirlos al tanque de premezclado. Una vez que este último alcanzaba el nivel adecuado y se cumplía la relación de fluidos requerida, la mezcla se enviaba al tanque auxiliar. Desde allí, una bomba de engranajes impulsaba la mezcla hacia el cavitador SPR, mientras una válvula de control regulaba el caudal del sistema. El proceso se repetía cíclicamente

hasta que el tanque auxiliar quedaba sin reservas, momento en el que el sistema se apagaba completamente. Sin embargo, también se contemplaba una opción de recirculación del fluido, mediante el uso de una válvula de bypass instalada entre la salida del cavitador y el tanque auxiliar. Esta configuración permitía retornar el fluido al sistema para su reprocesamiento, lo cual resulta útil en ensayos prolongados, ajustes experimentales o pruebas de eficiencia del proceso.

Para complementar esta información y facilitar la identificación de los tanques mencionados en la secuencia, se recomienda revisar la Figura 8 (*Diagrama inicial del Sistema de automatización del equipo de cavitación hidrodinámica*), en la cual se muestra la distribución general del sistema y la disposición de los componentes involucrados en el proceso.

Dado que la implementación original utilizaba un microcontrolador Arduino, fue necesario adaptar el sistema para su control mediante un PLC (Controlador Lógico Programable). Para la selección del PLC adecuado, se consideraron varios factores clave, como la cantidad de dispositivos a controlar y las especificaciones técnicas de cada uno. Luego de analizar diversas opciones, se optó por el Siemens S7-1500 CPU1512C-PN, debido a varias razones:

- **Fiabilidad y robustez:** Los PLCs de Siemens son ampliamente utilizados en la industria debido a su alto desempeño y estabilidad en entornos industriales exigentes.
- **Compatibilidad y escabilidad:** Este modelo permite una fácil integración con una amplia gama de sensores y actuadores, ofreciendo flexibilidad para futuras expansiones.
- **Disponibilidad:** En la universidad ya se contaba con este dispositivo, lo que facilitó su adquisición y redujo costos.

Figura 13.

PLC Siemens S7-1500 CPU1512C-PN



Nota. Se muestra el PLC utilizado para el proceso del sistema, junto con borneras y cables para la conexión de los dispositivos.

Una vez definido el hardware del PLC, se seleccionó TIA portal como entorno de desarrollo para la programación del Sistema de automatización. Este software fue elegido por su integración nativa con los PLCs de Siemens, lo que simplificó el diseño de la lógica de control y la configuración del hardware.

Para la interfaz HMI, inicialmente se consideró el uso de LabVIEW, dada su capacidad para desarrollar interfaces gráficas avanzadas y su versatilidad en la adquisición de datos. LabVIEW permite la creación de entornos visuales altamente personalizables, facilita la integración con múltiples protocolos de comunicación y cuenta con una amplia biblioteca de herramientas para el procesamiento y visualización de datos en tiempo real. Sin embargo, debido a que TIA Portal ofrece una plataforma integrada para el desarrollo de HMI con conexión directa al PLC, se optó por esta solución, ya que simplificó la integración del sistema y permitió una configuración más eficiente. TIA Portal proporciona una interfaz intuitiva, compatibilidad nativa con los PLCs Siemens y una sincronización optimizada entre la lógica de control y la visualización

del proceso, lo que reduce el tiempo de desarrollo y minimiza posibles errores en la transferencia de datos. La comunicación entre el PLC y el computador que ejecuta la HMI se realizó a través de una red Ethernet bajo el protocolo PROFINET, el cual permite una transferencia rápida, estable y sincronizada de datos. Esta configuración garantizó una integración confiable entre la lógica de control programada y la interfaz gráfica de usuario, optimizando la supervisión en tiempo real del sistema.

Además del PLC y la HMI, se definieron las variables críticas del proceso a partir de documentos técnicos sobre cavitación hidrodinámica. Se identificaron la presión y el caudal como parámetros esenciales para garantizar el correcto funcionamiento del sistema y la generación de cavitación, los cuales debían mantenerse dentro de valores específicos para asegurar la estabilidad del proceso. Con base en estos criterios, se seleccionaron tres sensores que cumplieran con los rangos operativos requeridos.

- **Dos sensores de presión**, uno ubicado aguas-arriba y otro aguas-abajo del cavitador, permitiendo monitorear la diferencia de presión necesaria para generar cavitación de manera eficiente. Estos sensores operan bajo el principio piezoresistivo, midiendo la variación de resistencia eléctrica causada por la deformación de un elemento sensible ante la presión aplicada. Fueron seleccionados con un rango de medición de 0 a 100 psi (aproximadamente 0 a 6.89 MPa), lo cual cubre con amplitud las condiciones de operación del sistema, donde la presión de entrada debe alcanzar aproximadamente 0.2 MPa y la de salida alrededor de 0.1 MPa.

Figura 14.*Sensor de Presión*

Nota. Se presenta el sensor de presión usado en el proceso del sistema.

- **Un sensor de caudal**, seleccionado para monitorizar continuamente el del flujo dentro del cavitador. Su funcionamiento se basa en el efecto Hall, generando pulsos eléctricos proporcionales al paso del fluido a través de un rotor interno. Este sensor tiene un rango de trabajo de 0.3 a 6 litros por minuto, que se ajusta adecuadamente al caudal nominal del proceso, estimado en aproximadamente 2 litros por minuto. Aunque el caudal requerido está en el límite superior, se consideró su uso adecuado para propósitos de monitoreo y supervisión general del sistema.

Figura 15.*Sensor de caudal*

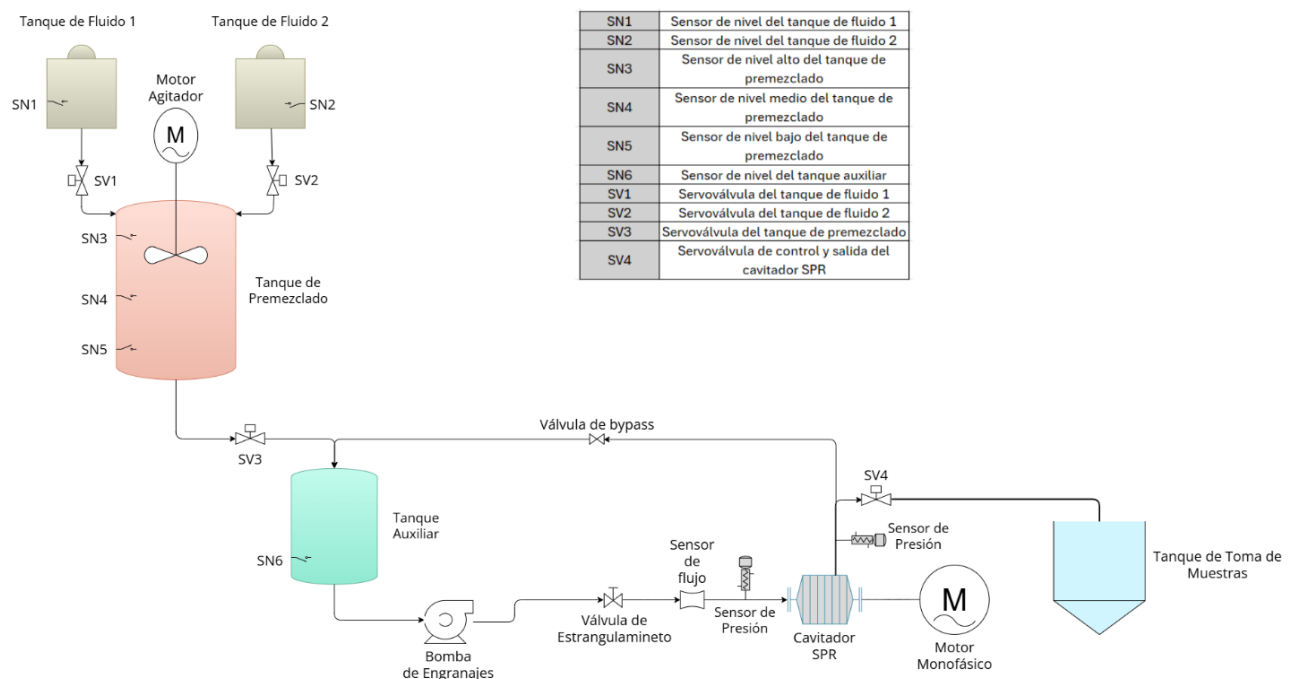
Nota. Se muestra el sensor de caudal para regular el flujo del sistema de cavitación.

Adaptado de "YF-S401 Flow Sensor", por Robotics.org.za, s.f. (<https://www.robotics.org.za/YF-S401>).

Finalmente, con la incorporación de estos nuevos dispositivos, se llevó a cabo el desarrollo de un nuevo diagrama del Sistema de automatización, integrando el PLC, los sensores y demás componentes del sistema automatizado. Además, se elaboró el diagrama P&ID (Piping and Instrumentation Diagram) del proceso, permitiendo una representación detallada de la instrumentación y el flujo de operación del sistema.

Figura 16.

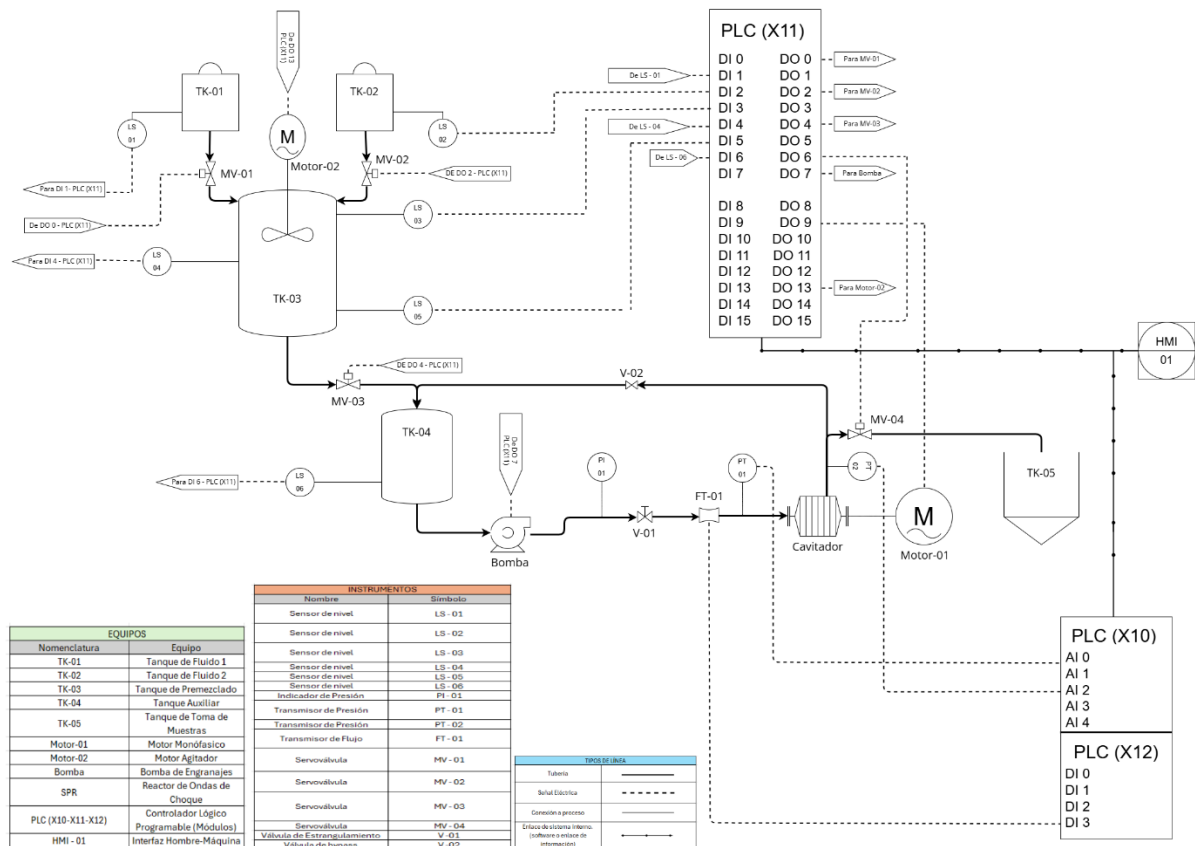
Sistema de automatización del sistema de cavitación hidrodinámica



Nota. Se muestra el diagrama del sistema de cavitación hidrodinámica moderno con los nuevos dispositivos incorporados.

Figura 17.

Diagrama P&ID del sistema de cavitación hidrodinámica.



Nota. Se presenta el diagrama de instrumentos y tuberías (P&ID) del sistema de cavitación hidrodinámica, con todos los dispositivos (equipos e instrumentos) incluidos en el proceso, sus respectivos símbolos y nomenclaturas.

3.6 Desarrollo de la lógica de control

Todo sistema automatizado necesita una unidad central de procesamiento, por lo tanto, era fundamental definir cómo funcionaría el sistema a nivel lógico. Para ello, se diseñó la

secuencia de control utilizando el diagrama GRAFCET, el cual permitió estructurar la lógica del proceso en estados, transiciones, y acciones. Posteriormente, esta lógica fue implementada en TIA Portal mediante programación en lenguaje escalera (Ladder o KOP), asegurando un control eficiente del sistema.

El desarrollo de la lógica de control se realizó en varias etapas:

3.6.1 Definición del "Main Block" (Bloque Principal).

Se estableció un Organization Block (OB) en TIA Portal, que actúa como el núcleo del programa y organiza el flujo principal de control. Este bloque se estructuró en diferentes segmentos, donde cada uno se encarga de llamar a funciones específicas para la gestión de tareas concretas del sistema.

3.6.2 Programación de las secuencias de control.

Con base en el diagrama GRAFCET (ver Figura 12), se definieron las secuencias de operación del sistema. Para ello, se desarrolló un Function en TIA Portal, que es un bloque de programa reutilizable que permite gestionar el orden lógico en el que deben ejecutarse los diferentes procesos, asegurando que cada estado ocurra de manera sincronizada y en el momento adecuado.

3.6.3 Implementación de las acciones del proceso.

Se crearon bloques de programación dedicados a la ejecución de acciones específicas dentro del sistema. Cada acción se definió en un Function, donde se programó la activación y desactivación de actuadores como las servoválvulas y la bomba, garantizando que cada operación ocurra en el momento preciso según la lógica de control.

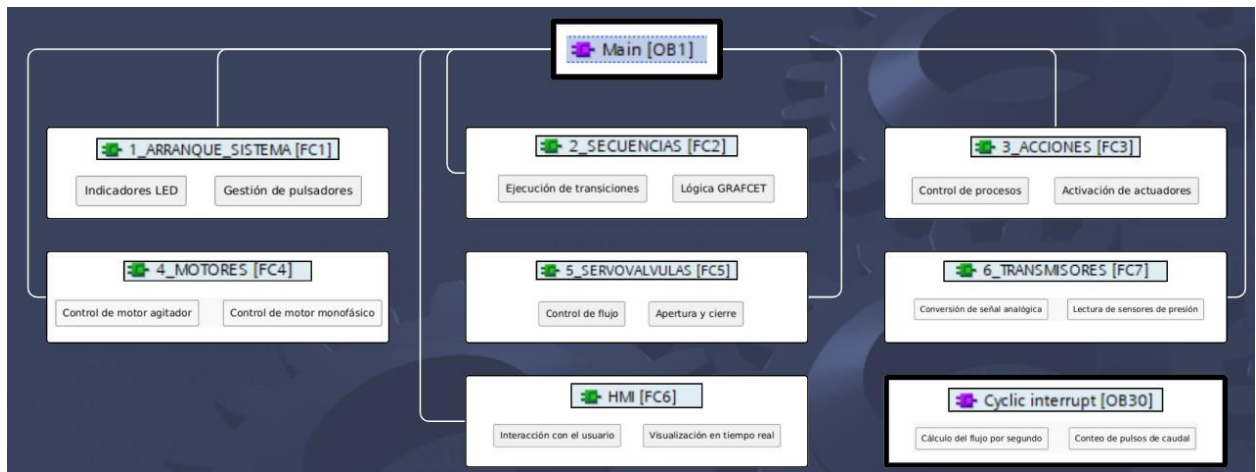
3.6.4 *Lógica individual de los dispositivos.*

Una vez establecida la estructura general del control, se procedió a la implementación de la lógica específica de cada componente del sistema:

- **Arranque y parada del sistema:** Se desarrolló una Function para la gestión de los pulsadores de encendido y apagado, junto con indicadores LED, asegurando un arranque y parada seguros.
- **Control de motores:** Se programó la activación y desactivación del motor monofásico y el agitador mediante un bloque dedicado, permitiendo su operación eficiente y segura.
- **Gestión de servoválvulas:** Se implementó la lógica de control de las servoválvulas, asegurando que su posición se ajuste correctamente según los requerimientos del proceso.
- **Gestión de transmisores de presión:** Se programó una Function para recibir y escalar las señales analógicas de los sensores de presión, permitiendo su lectura precisa e integración al sistema de monitoreo.
- **Medición de caudal con ejecución cíclica:** Se implementó un Organization Block (OB) cíclico por interrupción, configurado para ejecutarse cada segundo. Este bloque se encarga de calcular el caudal instantáneo a partir del número de pulsos generados por el sensor de flujo durante ese intervalo, garantizando una medición periódica y estable en el tiempo.
- **Interacción con la HMI:** Se estableció la vinculación de variables entre el PLC y la interfaz HMI, permitiendo la visualización y control en tiempo real de los dispositivos físicos

Figura 18.

Estructura de bloques de la lógica de control del sistema



Nota. Se representa los bloques de los programas usados en la lógica de control dentro del entorno de programación TIA Portal.

3.7 Conexión de los instrumentos y el PLC

El proceso de conexión de los dispositivos al PLC se realizó en varias etapas, comenzando con el diseño de las conexiones, la selección y adquisición de componentes adicionales, las pruebas individuales de funcionamiento y finalmente la integración completa del sistema.

3.7.1 Diseño de la conexión de los dispositivos

Inicialmente, se diseñó el esquema de conexión de cada uno de los dispositivos involucrados en la automatización del sistema. Este proceso se realizó manualmente, utilizando lápiz y papel, con el fin de visualizar la disposición y compatibilidad de los elementos antes de su

implementación. Como representación funcional del diseño de conexión y control del sistema, se elaboró un diagrama P&ID (ver figura 17), el cual detalla la ubicación de los dispositivos, su interacción y las líneas de flujo principales, sirviendo como base de referencia para el montaje e integración final del sistema.

Durante esta fase, se identificó la necesidad de componentes adicionales debido a la incompatibilidad entre los parámetros de operación de algunos dispositivos y el PLC. Específicamente, las diferencias en tensión y corriente requerían el uso de relés de estado sólido, y fuentes de alimentación adecuadas para garantizar la correcta comunicación y funcionamiento del sistema.

3.7.2 *Adquisición de materiales y componentes*

Con base en el diseño de conexión, se procedió a gestionar la compra de los componentes adicionales necesarios. Además, se realizó un cálculo detallado de la cantidad y tipos de cables requeridos para la instalación, considerando las especificaciones técnicas de cada dispositivo.

Esta selección se realizó considerando factores como la capacidad de corriente, la resistencia mecánica y la compatibilidad con los dispositivos.

Figura 19.

Componentes adicionales del sistema.



Nota. Se observa uno de los componentes adicionales para el proceso de conexión de los dispositivos en el sistema, un réle de estado sólido.

3.7.3 Pruebas individuales de conexión

Antes de proceder con la integración completa del sistema, se realizaron pruebas individuales para validar el correcto funcionamiento de cada dispositivo y su comunicación con el PLC. Durante esta etapa, se detectaron algunas inconsistencias:

- ***Inconsistencias en las servoválvulas***

Durante las pruebas de comunicación entre las servoválvulas y el PLC a través de la lógica de control en TIA Portal, se observó que la posición esperada no coincidía con la real. Por ejemplo, al programar un movimiento de 180 grados, algunos dispositivos solo alcanzaban los 90 grados o sobrepasaban el valor, mientras que otros mostraban un comportamiento errático con vibraciones constantes. Esto indicó un desajuste en los servomotores, posiblemente debido al desgaste tras un largo período de inactividad y al uso previo en el sistema. Para garantizar un funcionamiento estable y preciso, se decidió reemplazarlos por nuevos de la misma referencia.

Los demás dispositivos, como sensores, bomba y otros actuadores, no presentaron problemas durante las pruebas individuales.

3.7.4 Integración del sistema

Una vez realizadas las pruebas individuales y solucionadas las inconsistencias, se procedió al montaje definitivo de la conexión entre los dispositivos y el PLC. En esta fase se aseguró la

correcta interacción entre todos los elementos del sistema, garantizando la integración eficiente del control y monitoreo.

Para lograr una instalación organizada y funcional, se diseñó una distribución estratégica de los dispositivos dentro del sistema. Esta planificación permitió optimizar el cableado, minimizar interferencias y facilitar el mantenimiento. Además, para mejorar la presentación y orden del sistema, se emplearon fundas termoencogibles en el cableado, lo cual ayudó a estructurar los conductores, reducir la exposición de conexiones sueltas y mantener una apariencia más limpia y profesional. Los elementos principales se agruparon en cuatro ubicaciones generales (ver Tabla 1).

Tabla 1.

Distribución de los dispositivos en el sistema

Ubicación	Descripción
Tablero de Control Principal	Permite la manipulación manual de algunos elementos del sistema mediante pulsadores e indicadores visuales.
Tablero de Control Secundario	Aloja los dispositivos principales de automatización, incluyendo el PLC y los componentes auxiliares de control del motor.
Caja de Componentes Electrónicos	Caja dentro de la estructura base general que contiene los módulos de acondicionamiento de señales y protección

	del sistema eléctrico. (Rélés de Estado sólido, capacitor, etc).
Estructura General del Sistema	Contiene los elementos operativos del sistema, responsables de la ejecución y control del proceso. (Sensores, actuadores, fuente de alimentación, etc).

Nota. La tabla muestra la distribución de los dispositivos dentro del sistema de cavitación hidrodinámica, organizados estratégicamente para facilitar su operación y mantenimiento.

El resultado final fue un sistema completamente conectado y funcional, con dispositivos adaptados a los requerimientos del PLC, asegurando la operatividad y estabilidad del proceso de automatización.

Figura 20.

Montaje de conexionado final



Nota: En la imagen se muestra la disposición final de los componentes del sistema, incluyendo la integración del PLC, los dispositivos de control y los sensores. Se observa la correcta

distribución de los elementos en sus respectivas ubicaciones, asegurando una instalación organizada y funcional para la automatización del proceso.

3.8 Diseño e Implementación de la HMI

La interacción entre el usuario y el sistema debía ser intuitiva, eficiente y funcional. Para lograrlo, se diseñó una interfaz HMI que no solo representara gráficamente el proceso, sino que también permitiera su monitoreo y control en tiempo real. Para asegurar una planificación eficiente, en primera instancia se realizó un boceto a mano con lápiz y papel, lo que permitió visualizar de manera preliminar la estructura y funcionalidad esperada de la interfaz. Este diseño inicial estuvo guiado por referencias como videos, artículos y documentación técnica.

Con una idea clara del diseño a implementar, se evaluaron diferentes plataformas para el desarrollo de la HMI. Inicialmente, se consideró el uso de LabVIEW, sin embargo, se optó por la herramienta WinCC Runtime Start integrada en TIA Portal, debido a su compatibilidad con el sistema y su integración nativa con los controladores Siemens. Esta herramienta permite la creación de pantallas HMI personalizadas, la configuración de variables en tiempo real y la integración con sistemas de control automatizados.

3.8.1 Estructura de la HMI

El diseño de la HMI se estructuró en dos tipos de pantallas integradas en la herramienta:

- Pantalla principal (Root Screen)
- Pantallas Emergentes (Pop-up Screens)

3.8.2 *Pantalla principal*

La pantalla principal constituye el núcleo de la HMI, proporcionando una visualización general del Sistema de automatización. Su diseño se basó en el diagrama del sistema (ver Figura 16), representando gráficamente los elementos clave como tanques, sensores, tuberías y actuadores. También incluye el panel de control y pulsadores de navegación.

Para su implementación, primero se montaron los gráficos del proceso utilizando los recursos visuales de WinCC Runtime Start. Posteriormente, se estableció la interacción entre los elementos gráficos y las variables del código de control en el PLC, asegurando la correspondencia entre la visualización en pantalla y el estado real del sistema.

3.8.3 *Pantallas emergentes*

Las pantallas emergentes en un entorno HMI de TIA Portal permiten mostrar información adicional o configuraciones específicas sin sobrecargar la pantalla principal. Son utilizadas para mejorar la navegación y facilitar la interacción con los distintos elementos del sistema.

Para este proyecto, se diseñaron un total de 10 pantallas emergentes, organizadas de la siguiente manera:

1. **Configuraciones:** Brinda acceso a las propiedades de diferentes dispositivos del sistema y permite navegar hacia tres subpantallas específicas.
2. **Tanques:** Derivada de la pantalla de configuraciones, muestra información sobre los tanques, incluyendo su estado (lleno o vacío) y sus especificaciones.
3. **Servoválvulas:** También derivada de la pantalla de configuraciones, proporciona detalles sobre el estado de las servoválvulas (encendidas o apagadas) y permite su control manual.

4. **Otros:** Permite visualizar propiedades y configuraciones de dispositivos como la bomba, los motores y el cavitador, con la opción de encender y apagar los equipos (excepto el cavitador, que es un equipo autónomo).

5. **Ángulos:** Permite introducir los valores angulares de operación de las servoválvulas (por ejemplo, 0° para apagado y 180° para encendido).

6. **Temporizadores:** Facilita la configuración de los tiempos de llenado y vaciado de los tanques específicos dentro del sistema.

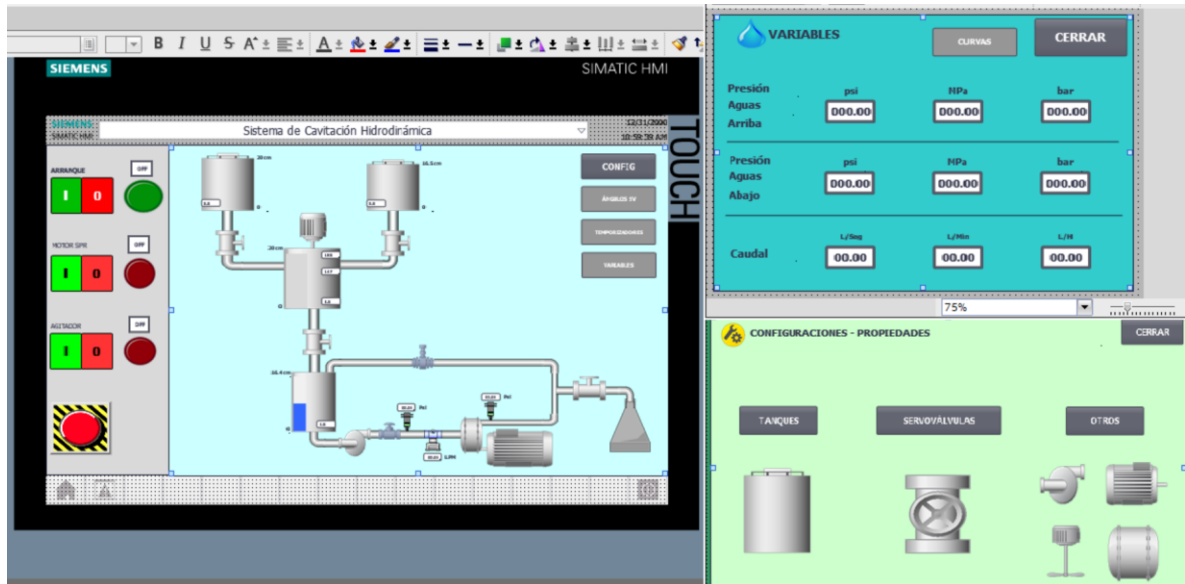
7. **Variables:** Muestra en tiempo real los valores de las variables críticas del proceso, como el caudal y la presión en diferentes puntos del sistema.

8. **Curvas:** Permite acceder a la representación gráfica de las variables monitoreadas.

9. **Curva de caudal:** Muestra la evolución del caudal en tiempo real mientras el sistema está en operación.

10. **Curva de presión:** Representa las variaciones de presión aguas arriba y aguas abajo durante la ejecución del proceso.

El desarrollo de estas pantallas siguió el mismo procedimiento de la pantalla principal: implementación de gráficos, integración con variables del PLC y configuración de la lógica de interacción.

Figura 21.*Diseño HMI*

Nota. En esta imagen se muestra el diseño final de la HMI desarrollado en TIA Portal WinCC Runtime, allí se representan la pantalla principal y algunas de las pantallas emergentes. La interfaz permite la supervisión y control de los dispositivos del sistema de cavitación hidrodinámica en tiempo real.

3.8.4 Interconexión con el PLC

Una vez finalizado el diseño de la HMI, se llevó a cabo su integración con el PLC Siemens, estableciendo la comunicación entre la interfaz gráfica y los dispositivos del sistema. Esta conexión permite que los datos del proceso sean reflejados en tiempo real en la interfaz, y que los operadores puedan interactuar con los dispositivos desde la HMI.

Cabe destacar que, aunque inicialmente se contempló la implementación de un dispositivo HMI físico, los costos elevados impidieron su adquisición. Por esta razón, la HMI se encuentra en modo de simulación, operando desde una laptop con WinCC Runtime Start.

4 Integración y pruebas del sistema

Una vez finalizado el diseño de la interfaz HMI y su integración con la lógica de control, se procedió con la fase de pruebas del sistema. Esta etapa tuvo como objetivo validar el correcto funcionamiento de los componentes físicos, así como su interacción con la interfaz gráfica y el controlador lógico programable (PLC).

4.1 Verificación inicial del sistema de control

Se comenzó con una revisión general de las conexiones del sistema y la puesta a punto de los componentes físicos. Se verificó la alimentación eléctrica, las conexiones al PLC y el funcionamiento básico del HMI. Para evitar fallas por conexiones inadecuadas o comportamiento inesperado, se optó por realizar pruebas parciales del sistema antes de operar todos los elementos simultáneamente. Esta estrategia permitió comprobar individualmente el comportamiento de sensores críticos, como los de caudal y presión, asegurando que reportaran valores coherentes y con las unidades esperadas.

4.2 Prueba de llenado de tanques y premezcla

El procedimiento se inició con el llenado de los tanques de fluido 1 y fluido 2. Desde el HMI se activaron las servoválvulas SV1 y SV2, permitiendo el paso de los líquidos hacia el tanque de premezclado. Esta etapa se ejecutó correctamente, con un funcionamiento adecuado tanto de las válvulas como del sistema de monitoreo.

Posteriormente, se abrió la SV3, transfiriendo el contenido del tanque de premezclado al tanque auxiliar, sin presentar fallos en la operación. Sin embargo, durante el llenado de este último, se detectó una fuga de líquido causada por un mal ajuste del sensor de nivel instalado en el tanque.

El inconveniente fue solucionado ajustando manualmente el sensor, logrando así un sellado correcto.

4.3 Evaluación del sistema de bombeo

Se procedió a activar la bomba de engranajes, responsable de impulsar el fluido hacia el cavitador. Durante esta operación se identificó una nueva fuga, atribuida a una placa mal ajustada. Al corregir esta, surgió un segundo inconveniente: la falta de movimiento de los engranajes, causada por el desgaste del empaque entre la placa y el sistema mecánico. Esto impedía el giro libre de la bomba. La solución consistió en reemplazar el empaque por uno de mayor espesor, lo que permitió restaurar la operatividad del componente sin interferencias mecánicas.

4.4 Validación del sensor de caudal y comportamiento del flujo

Superado el inconveniente en la bomba, el fluido fue conducido a través del sistema, pasando por el sensor de caudal, el cual reportó correctamente el valor del caudal en tiempo real al HMI. Se observó una leve variación en los valores de medición, comportamiento esperado debido a factores como turbulencia, variaciones de presión o condiciones transitorias del flujo. Esta fluctuación se consideró aceptable para las condiciones de operación del sistema.

4.5 Comprobación de sensores de presión

Al alcanzar el sensor de presión aguas arriba del cavitador, se detectó que no emitía lecturas. Tras inspección, se identificó que la bomba estaba alimentada con 5 V, insuficiente para generar la presión requerida. Se reemplazó por una fuente de 12 V, su valor nominal, tras lo cual el sensor funcionó correctamente. El sensor aguas abajo operó con normalidad, aunque presentó una fuga menor por mal sellado en la conexión roscada, solucionada aplicando cinta de teflón.

Ambos sensores mostraron ligeras variaciones en sus lecturas, atribuibles a interferencias eléctricas o ruido en el conexionado, propios de señales analógicas de voltaje que luego son convertidas a presión mediante programación en el PLC

Figura 22.

Registro de variables de caudal y presión.

VarName	TimeString	VarValue
ValorPresion_1_Filt	09/06/2025 10:02	0,307085
ValorPresion_1_Filt	09/06/2025 10:02	0,3083492
ValorPresion_1_Filt	09/06/2025 10:02	0,2972353
ValorPresion_1_Filt	09/06/2025 10:02	0,3263675
ValorPresion_1_Filt	09/06/2025 10:02	0,322085
ValorPresion_1_Filt	09/06/2025 10:02	0,3032137
ValorPresion_1_Filt	09/06/2025 10:02	0,3208803
ValorPresion_2_Filt	09/06/2025 10:01	0,04772988
ValorPresion_2_Filt	09/06/2025 10:01	0,04125886
ValorPresion_2_Filt	09/06/2025 10:01	0,04382111
ValorPresion_2_Filt	09/06/2025 10:01	0,04177671
ValorPresion_2_Filt	09/06/2025 10:01	0,04638606
ValorPresion_2_Filt	09/06/2025 10:01	0,06172694
ValorPresion_2_Filt	09/06/2025 10:01	0,04126159
Litros_TOTAL_ACUM	09/06/2025 10:48	0,3265306
Litros_TOTAL_ACUM	09/06/2025 10:48	0,3267007
Litros_TOTAL_ACUM	09/06/2025 10:48	0,3268708
Litros_TOTAL_ACUM	09/06/2025 10:48	0,3275511
Litros_TOTAL_ACUM	09/06/2025 10:48	0,3275511
Litros_TOTAL_ACUM	09/06/2025 10:48	0,3275511
Litros_TOTAL_ACUM	09/06/2025 10:48	0,3275511
Litros_TOTAL_ACUM	09/06/2025 10:48	0,3282313
Litros_TOTAL_ACUM	09/06/2025 10:48	0,3289116

Nota. La imagen presenta los datos obtenidos en tiempo real desde el sistema automatizado, mostrando el comportamiento de dos variables críticas: caudal y presión. En la parte derecha se observa la variable “Litros_TOTAL_ACUM”, correspondiente al caudal acumulado medido en litros, junto con sus respectivas marcas de tiempo. En la parte izquierda, se detallan los valores de las variables “ValorPresion_1_Filt” y “ValorPresion_2_Filt”, asociadas a los sensores de presión ubicados aguas arriba y aguas abajo del cavitador, expresadas en PSI.

4.6 Prueba final del sistema completo

Con todos los ajustes realizados y los elementos previamente validados, se realizó la prueba final del sistema con todos los dispositivos conectados. Se ejecutó la secuencia completa desde el

arranque del proceso hasta su fase final, monitoreando la respuesta de cada componente desde el HMI.

El resultado fue exitoso:

- Los sensores reportaron valores precisos y estables.
- Los actuadores respondieron correctamente a los comandos emitidos desde la interfaz gráfica.
- No se presentaron fallos en la comunicación entre el PLC y el HMI.
- La lógica de control implementada fue ejecutada conforme a lo esperado.

Figura 23.

Resultados pruebas de funcionamiento



Nota. Se muestran los valores registrados por los sensores de presión y caudal durante la ejecución de pruebas, así como la gráfica generada en la HMI en tiempo real. Las variaciones evidenciadas en la señal de presión se atribuyen a posibles ruidos eléctricos en el circuito, propios del tipo de sensor empleado.

Para complementar las evidencias obtenidas durante esta fase, se incluye un video demostrativo de las pruebas de funcionamiento, disponible en el Anexo A.

5 Conclusiones

El desarrollo del presente proyecto permitió cumplir de forma satisfactoria el objetivo principal: diseñar e implementar el monitoreo y automatización de un sistema de cavitación hidrodinámica a nivel de laboratorio, utilizando un PLC y una interfaz HMI. A partir de esta solución, se logró modernizar un equipo previamente inactivo, integrando tecnología de automatización que facilita su operación, seguimiento en tiempo real y futura adaptabilidad a nuevos requerimientos experimentales.

Durante la implementación, se identificaron varias tendencias significativas. Una de ellas fue la necesidad de adaptar y ajustar componentes debido a las condiciones reales del sistema, como los problemas de compatibilidad eléctrica, fallas mecánicas por desuso prolongado y comportamientos irregulares en algunos dispositivos como las servoválvulas y la bomba. Estos hallazgos reflejan la importancia de considerar no solo el diseño teórico, sino también los aspectos prácticos de campo, lo cual constituye una lección clave para futuros trabajos similares.

La automatización no solo permitió recuperar la operatividad del sistema, sino que mejoró sustancialmente su funcionalidad. Ahora es posible monitorear variables críticas como caudal y presión en tiempo real, ajustar parámetros de operación desde la HMI y realizar pruebas experimentales con mayor control y repetibilidad. Esto representa una contribución directa al campo de investigación aplicada en cavitación hidrodinámica, tanto en lo académico como en su potencial transferencia hacia entornos industriales.

Dentro de las limitaciones identificadas, se destacan las relacionadas con la disponibilidad de recursos económicos, lo cual restringió la adquisición de ciertos componentes, como el panel físico HMI, que debió ser simulado desde un computador. También se observaron ligeros ruidos en las señales de los sensores de presión, lo que evidencia la necesidad de considerar técnicas adicionales de filtrado o acondicionamiento de señales para garantizar mayor precisión en futuras implementaciones.

En comparación con trabajos previos, este trabajo aporta una solución tangible que no solo recupera un equipo experimental, sino que lo transforma en una herramienta más poderosa, alineada con estándares modernos de automatización industrial. La experiencia durante su desarrollo permitió aplicar de forma integrada los conocimientos adquiridos a lo largo de la carrera universitaria, especialmente en áreas automatización, instrumentación, y sistemas de control. Esta aplicación práctica consolidó competencias técnicas clave y fortaleció la capacidad de análisis, diseño y resolución de problemas en escenarios reales, acercando significativamente la formación académica a las demandas del entorno profesional.

Finalmente, este proyecto deja como aprendizaje el valor de planificar rigurosamente, validar constantemente cada etapa de desarrollo y documentar con claridad cada avance. La ejecución práctica de este tipo de soluciones fortalece la formación profesional del estudiante, al tiempo que abre camino para nuevas investigaciones y mejoras futuras en sistemas de tratamiento de fluidos por cavitación.

6 Recomendaciones

A partir del desarrollo del presente proyecto y con base en las limitaciones identificadas durante su ejecución, se proponen las siguientes recomendaciones con el fin de guiar futuros trabajos que busquen complementar, optimizar o ampliar la solución implementada:

1. Debido a restricciones presupuestales, el sistema opera actualmente con una interfaz en simulación. Se recomienda, en fases futuras, la adquisición e integración de un panel HMI físico que garantice una experiencia más cercana a entornos industriales reales y una mayor robustez operativa.
2. Para fortalecer la seguridad y confiabilidad del sistema, sería pertinente incluir alarmas visuales y sonoras que adviertan sobre fallas en dispositivos, desconexiones o variables fuera de rango. Esta funcionalidad podría mejorar la respuesta ante eventos no deseados.
3. Durante las pruebas se identificaron pequeñas variaciones (ruido) en los sensores de presión, posiblemente causadas por interferencias o configuración de entrada. Se recomienda la implementación de filtros físicos o digitales (por software) para mejorar la precisión de las mediciones.
4. El sistema desarrollado puede ser utilizado como herramienta didáctica en cursos de automatización, instrumentación, control de procesos. Se recomienda su documentación

completa y la creación de material pedagógico para fomentar su uso en la formación de nuevos profesionales.

5. Actualmente, la medición de nivel en los tanques se realiza mediante sensores digitales tipo “level switch”, los cuales indican si el fluido ha alcanzado un punto específico predefinido. Si se desea una lectura más precisa y continua del nivel, se recomienda implementar sensores analógicos que permitan medir el valor exacto del nivel del líquido en tiempo real. Esta mejora facilitaría una gestión más detallada de los volúmenes y una optimización del control del proceso. Cabe aclarar que no se realizó este cambio durante el desarrollo del proyecto debido a la intención de trabajar con la infraestructura existente y a limitaciones presupuestales.

Referencias Bibliográficas

- Araujo González, J. J. (2015). *Instrumentación de un circuito hidrodinámico para la observación de la cavitación totalmente desarrollada con fluidos viscosos elásticos*. Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México, México, D. F.
- Grupo SYZ. (s. f.). *Interfaz Hombre-Máquina (HMI)*. <https://grupo-syz.com/todos-los-productos/automatizacion/inferfaz-hombre-maquina-hmi/>
- Gútiérrez, I. (2023, 21 abril). TIA Portal: ¿Qué es? - Programación Siemens. Programación Siemens. <https://programacionsiemens.com/que-es-tia-portal/>
- Huang, Y., & Chen, Z. (2023). *Handling of Big Data in Agricultural Remote Sensing*. En Springer eBooks (pp. 557-566). https://doi.org/10.1007/978-3-031-24861-0_215
- ISA-95 Standard: Enterprise-Control System Integration. (s. f.). isa.org. <https://www.isa.org/standards-and-publications/isa-standards/isa-95-standard>
- LiOA. (s. f.). *PLC là gì? Đặc điểm và công dụng đặc biệt và nổi bật của PLC*. <https://nhatlinhlio.com.vn/plc-la-gi/>
- Manesis, S., & Nikolakopoulos, G. (2018). *Introduction to Industrial Automation*. CRC Press.
- MES Automation. (s. f.). *ISA 95: por qué los sistemas MES necesitan cumplir esta norma*. <https://mesautomation.com/isa-95/>
- Peng, H. (2023). *Human Machine Interface*. En Springer eBooks (pp. 613-621). https://doi.org/10.1007/978-3-031-24861-0_182
- Ranade, V. V., Bhandari, V. M., Nagarajan, S., Sarvothaman, V. P., & Simpson, A. T. (2022). *Hydrodynamic cavitation: Devices, Design and Applications*. John Wiley & Sons.

Rodríguez Herreño, B. A., & Vera Rozo, J. R. (2016). *Diseño y construcción de un prototipo para obtención continua de biodiesel mediante cavitación hidrodinámica*. Universidad Industrial de Santander.

Sarmiento Cabezas, I. D., & Sánchez Sepúlveda, R. (2013). *Automatización de máquina de cavitación hidrodinámica*. Universidad de los Andes, Facultad de Ingeniería, Departamento de Ingeniería Eléctrica y Electrónica, Bogotá, Colombia.

Southwest Research Institute. (2016). Helping heavy crudes go the distance. <https://www.swri.org/newsroom/technology-today/helping-heavy-crudes-go-the-distance>

Voltek Water. (s. f.). *Hydrodynamic cavitation*. <https://www.voltekwater.com/hydrodynamic-cavitation>

Apéndices

APÉNDICE A. VIDEO DE PRUEBA AL SISTEMA

<https://drive.google.com/file/d/1wWpA9LJoWMdampbSMmhdCH8EEGppWHVk/view?usp=sharing>

APÉNDICE B. MANUAL TÉCNICO Y DE OPERACIÓN DEL SISTEMA

[https://drive.google.com/file/d/17Fh8xUtUQqagsaotxXjgBDEWIYo5vwi4/view?usp=drive link](https://drive.google.com/file/d/17Fh8xUtUQqagsaotxXjgBDEWIYo5vwi4/view?usp=drive_link)