

Sistema automático de distribución hidráulica para zona residencial controlado mediante PAC y monitoreado con HMI

Automatic hydraulic distribution system for residential area controlled by PAC and monitored with HMI

E. Flores-García ^a, E. Alvarado-Santos ^b, R. Calderón-Medina ^d, L.V. Sánchez-Baltazar ^e

Abstract:

This study presents the design, implementation, and validation of an automated system for controlling and monitoring a potable water distribution network in a residential area. The proposed solution is based on the integration of a Programmable Automation Controller (PAC) and a Human-Machine Interface (HMI). The developed prototype enables real-time supervision of critical variables (pressure & level) and the automatic execution of filling sequences, ensuring an equitable and efficient supply. The PAC was programmed in Ladder Logic (IEC 61131-3) using *Proficy Machine Edition*, while the HMI was designed with *Cimplicity Workbench*. The results demonstrate the system's robustness in automatic mode, the effectiveness of manual mode for specific interventions, and its capacity for early fault detection. The feasibility analysis confirms that the proposed architecture, despite the initial investment, represents a technically sound and economically favorable solution in the medium term for the modernization of hydraulic infrastructures.

Keywords:

HMI, PAC, SCADA, water distribution network, automation, process control.

Resumen:

Este estudio presenta el diseño, implementación y validación de un sistema automatizado para el control y monitoreo de una red de distribución de agua potable en una zona residencial. La solución propuesta se basa en la integración de un Controlador de Automatización Programable (PAC) y una Interfaz Humano-Máquina (HMI). El prototipo desarrollado permite la supervisión en tiempo real de variables críticas (presión y nivel) y la ejecución automática de secuencias de llenado, garantizando un suministro equitativo y eficiente. La programación del PAC se realizó en lenguaje Escalera (IEC 61131-3) utilizando *Proficy Machine Edition*, mientras que la HMI se diseñó con *Cimplicity Workbench*. Los resultados demuestran la robustez del sistema en modo automático, la efectividad del modo manual para intervenciones específicas y la capacidad de detección temprana de fallas. El análisis de viabilidad confirma que la arquitectura propuesta, pese a la inversión inicial, representa una solución técnicamente sólida y económicamente favorable a mediano plazo para la modernización de infraestructuras hidráulicas.

Palabras Clave:

HMI, PAC, SCADA, red de distribución de agua, automatización, control de procesos.

Introducción

Los sistemas de distribución de agua potable representan una infraestructura crítica para el bienestar social y el desarrollo

económico. No obstante, estas redes enfrentan desafíos operativos recurrentes que impactan significativamente su eficiencia. Problemas como caídas de presión, picos de flujo y sobrepresiones durante periodos de baja demanda no solo

^{a,b,c,d} Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo | Escuela Superior de Tizayuca | Tizayuca-Hidalgo | México, <https://orcid.org/0000-0002-4606-8217>, Email: efloresg@uaeh.edu.mx; <https://orcid.org/0000-0002-1058-3794>, Email: eduardo_alvarado@uaeh.edu.mx; <https://orcid.org/0000-0002-7292-6051>, Email: rafael_calderon@uaeh.edu.mx; <https://orcid.org/0000-0002-4862-2410>, Email: sa415443@uaeh.edu.mx

Fecha de recepción: 02/09/2025, Fecha de aceptación: 09/10/2025, Fecha de publicación: 05/01/2026

DOI: <https://doi.org/10.29057/esti.v11i22.15839>



afectan la calidad del servicio, sino que generan pérdidas sustanciales de agua y energía. A nivel global, se estima que las pérdidas por fugas en redes de distribución pueden superar el 30% del volumen total suministrado [1], mientras que el consumo energético asociado al bombeo representa hasta el 40% de los costos operativos [2]. Estos fenómenos comprometen la sostenibilidad del recurso hídrico y la eficiencia hidráulica, como han documentado [3]. Ante esta problemática, la sectorización de redes y la implementación de sistemas de control avanzado se han posicionado como estrategias clave para optimizar la gestión, reducir pérdidas y mejorar la confiabilidad del suministro [4, 5]. En este contexto, las tecnologías de automatización han adquirido un rol protagónico. La adopción de plataformas de supervisión, control y adquisición de datos (SCADA) ha demostrado beneficios tangibles en la monitorización en tiempo real, el diagnóstico temprano de fallas y la toma de decisiones operativas [6, 7]. Paralelamente, la integración de Controladores Lógicos Programables (PLC) e Interfaces Humano-Máquina (HMI) ofrece una alternativa robusta y costo-efectiva para la automatización de procesos, con aplicaciones exitosas reportadas en sistemas de agua urbanos y rurales [8, 9].

La evolución hacia frameworks de Industria 4.0 y el Internet Industrial de las Cosas (IIoT) está impulsando la modernización de las infraestructuras hidráulicas, orientándolas hacia una gestión inteligente y basada en datos [10]. En esta transición, conceptos como los gemelos digitales comienzan a explorarse para la simulación y optimización predictiva de redes [11], aunque su implementación a escala real aún enfrenta barreras técnicas y económicas. Por lo tanto, existe una necesidad palpable de soluciones escalables y prácticas que sirvan como puente entre los sistemas de control tradicionales y estas arquitecturas inteligentes emergentes.

El presente trabajo se enmarca en esta tendencia y tiene como objetivo principal demostrar la viabilidad técnica y operativa de una arquitectura de automatización basada en un Controlador de Automatización Programable (PAC) y una HMI para mejorar la eficiencia de una red de distribución de agua potable en una zona residencial. Los objetivos específicos son: (1) diseñar e implementar un prototipo a escala de laboratorio que emule una red de distribución abierta; (2) desarrollar los algoritmos de control para gestionar de manera automática y secuencial el llenado de tanques, incorporando modos manuales y rutinas de protección; y (3) validar el desempeño del sistema en términos de confiabilidad y capacidad de respuesta ante fallas.

La principal contribución de este estudio radica en la validación experimental de una estrategia de control cíclico automático con transiciones seguras entre modos operativos, implementada con hardware industrial estándar (PAC GE Fanuc RX3i). Este enfoque no solo garantiza una distribución equitativa, sino que sienta las bases técnicas para futuras implementaciones escalables y su integración en esquemas de gestión más amplios, como sistemas SCADA municipales o plataformas IIoT, constituyendo un caso de estudio reproducible y de bajo riesgo para la modernización de infraestructuras hidráulicas.

1. Marco Teórico

1.1 Red de distribución. Definición y elementos

Una red de distribución consiste en un conjunto de tuberías, válvulas, tanques y tomas domiciliarias que conducen el agua desde los puntos de almacenamiento hasta los usuarios finales [9]. Se clasifica en tres tipos principales:

Redes Ramificadas o Abiertas: Tienen una estructura similar a un árbol, donde una tubería principal de mayor diámetro se subdivide en ramas secundarias hacia los puntos de consumo. Su característica principal es la falta de interconexiones entre las tuberías secundarias, lo que evita retornos y puede crear puntos con estancamiento de agua [11]. (Ver Figura 1).

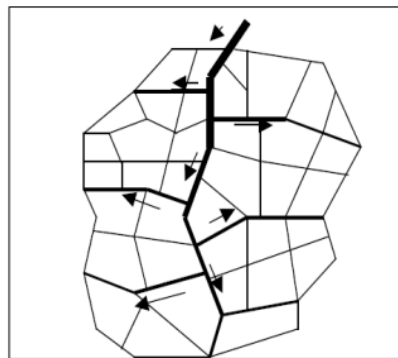


Figura 1. Esquema representativo de una red de distribución ramificada, donde el flujo se dirige desde una fuente principal hacia ramales terminales sin retorno [11].

Redes Malladas o Cerradas: Se caracterizan por formar circuitos cerrados o anillos con las tuberías. Esta configuración, que requiere cálculos hidráulicos más complejos, permite una circulación continua del agua, eliminando los puntos muertos y mejorando la confiabilidad del suministro [12]. (Ver Figura 2).

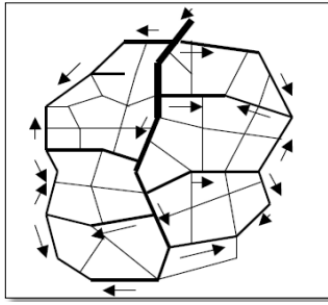


Figura 2. Ejemplo de red cerrada, cuya estructura en anillo es recomendada para mejorar la confiabilidad del suministro en sistemas urbanos.

Sistemas Mixtos: Combinación de las dos anteriores, donde una red mallada principal asegura el flujo continuo y la redundancia, mientras que redes ramificadas se conectan a ella para servir a áreas periféricas o de menor densidad. Esta es la configuración más habitual en ciudades, ya que equilibra fiabilidad y costo.

1.2 Automatización PLC e HMI

La automatización de procesos industriales ha encontrado en la dupla PLC y HMI una de sus bases tecnológicas más robustas y versátiles. Esta integración es fundamental para crear sistemas de control eficientes, confiables y accesibles para los operadores.

PLC

Los PLC son dispositivos electrónicos industriales robustos, diseñados para operar en ambientes severos con altos niveles de ruido eléctrico, vibración y variaciones de temperatura. Su función principal es controlar procesos o máquinas mediante una lógica programada por el usuario. Estos dispositivos monitorean las entradas provenientes de sensores (por ejemplo, pulsadores, sensores de nivel o presión), procesan la información según el programa almacenado en su memoria y activan las salidas correspondientes para actuar sobre actuadores (como válvulas, contactores o motores) [11]. La principal ventaja de los PLC reside en su flexibilidad, ya que los cambios en la lógica de control se realizan mediante software, eliminando la necesidad de costosas y complejas reconexiones de sistemas de relés electromecánicos.

Interfaz HMI

La HMI es el componente que actúa como puente de comunicación entre el operario y el proceso automatizado. Consiste típicamente en una pantalla táctil o una estación de trabajo que permite visualizar el estado del proceso en tiempo real mediante gráficos, diagramas sinópticos y alarmas. Más allá de la visualización, la HMI facilita la interacción,

permitiendo al operador introducir consignas (setpoints), realizar comandos manuales (como el arranque o parada de un equipo) y alarmas [11]. Su objetivo es transformar los datos crudos del proceso en información comprensible y accionable, optimizando la supervisión y el control.

Integración PLC-HMI y su rol en SCADA

La verdadera potencia de estos sistemas se despliega cuando el PLC y la HMI se integran. El PLC actúa como el "cerebro" del sistema, ejecutando las tareas de control de manera rápida y confiable, mientras que la HMI funciona como la "cara" del sistema, proporcionando una interfaz intuitiva para los usuarios humanos.

Esta integración es, a su vez, la piedra angular de sistemas de supervisión más amplios, como los Sistemas de Control Supervisor y Adquisición de Datos (SCADA). En una arquitectura SCADA, múltiples PLCs distribuidos en campo recopilan datos y ejecutan el control local, mientras que las HMI, junto con servidores centrales, ofrecen capacidades avanzadas de supervisión global, adquisición histórica de datos, generación de reportes y gestión de alarmas a nivel de toda la planta o red de distribución [12] (Figura 3). De esta forma, la automatización con PLC y HMI no solo mejora la eficiencia operativa local, sino que también sienta las bases para una gestión integral y inteligente de los procesos.

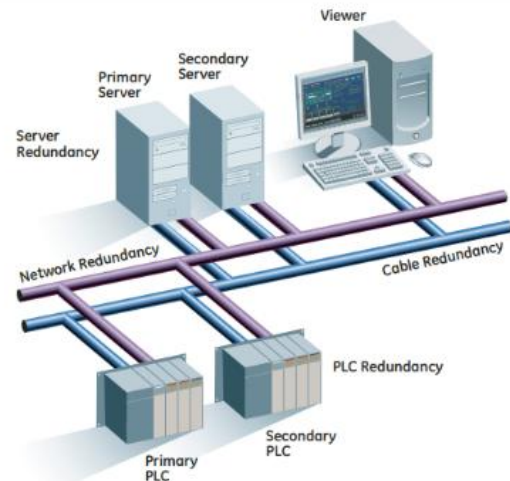


Figura 3. Topología de un sistema SCADA utilizado en gestión de agua, con controladores GE Fanuc a nivel de campo, interfaz operador HMI y servidor de historial de datos, similar al entorno de integración propuesto en este trabajo. Basado en [13].

1.3 Instrumentación y actuadores

La base fundamental de cualquier sistema de control automatizado reside en la capacidad de medir variables del

proceso y actuar sobre él de manera precisa y confiable. En esta sección se describen los principios de instrumentación y los actuadores que constituyen la capa física de adquisición de datos y control, esenciales para la implementación de soluciones basadas en PLC y SCADA.

Fundamentos de la Instrumentación

La instrumentación se define como la tecnología empleada para medir cantidades físicas, con el fin de obtener información para su monitoreo y control [14]. Un sistema de instrumentación moderno se compone típicamente de sensores, transmisores y una unidad procesadora (como un PLC), funcionando bajo el principio de transducción. Para comprender su operación, es crucial definir los siguientes conceptos clave:

Definición 1: Una variable física es un parámetro que describe el comportamiento de un fenómeno físico [15].

Definición 2: Una magnitud física es una propiedad medible de un sistema a la que se le puede asignar un valor numérico mediante un proceso de cuantificación [14].

Definición 3: Un sensor es un dispositivo que detecta una magnitud física o química (variable de instrumentación) y la transforma en una señal eléctrica utilizable [16].

Definición 4: Un transductor es un dispositivo con un alcance más amplio que un sensor, capaz de convertir un tipo de energía de entrada en otro diferente a la salida (e.g., electromecánico, neumático-hidráulico) [14].

Definición 5: Un transmisor toma la señal del sensor o transductor y la condiciona para transmitirla a distancia hacia el controlador [14].

Definición 6: La precisión es la capacidad de un instrumento para entregar repetidamente el mismo valor ante una señal de medición constante [14].

La selección de los componentes de instrumentación no es únicamente una decisión técnica, sino que también depende de factores económicos, de mantenimiento y de la logística de repuestos, aspectos críticos para la sostenibilidad del sistema [17].

Actuadores de Control

El actuador de control es el componente encargado de transformar una señal de comando (generalmente del PLC) en una acción física sobre el proceso. Transforma energía eléctrica, neumática o hidráulica para activar un mecanismo, regulando así el suministro de energía o material al proceso

[16]. Por lo general, cada lazo de control cuenta con un actuador final, siendo las válvulas los más comunes.

La selección del actuador adecuado depende de la acción requerida (on/off, proporcional) y la velocidad de respuesta. Los tipos principales se resumen en la Tabla 1.

Tabla 1. Tipos principales de actuadores de control.

Tipo de Actuador	Fuente de Energía	Características Principales
Neumático	Aire comprimido	Rápido, seguro en ambientes explosivos, fuerza moderada.
Hidráulico	Fluido hidráulico	Fuerza muy elevada, preciso, para cargas pesadas.
Eléctrico	Energía eléctrica	Alto control de posición, fácil integración, limpieza.

Válvulas como Actuadores Finales

Las electroválvulas, como caso particular, son actuadores electromecánicos que reaccionan a pulsos eléctricos para abrirse o cerrarse, controlando el flujo de fluidos [18]. Según su función, se clasifican en tres familias:

- **Válvulas de Interceptación:** Bloquean o permiten el flujo, o cambian su sentido.
- **Válvulas de Regulación:** Varían el flujo, presión o caudal de forma continua o escalonada.
- **Válvulas de Distribución:** Desvían el flujo entre diferentes caminos sin variar significativamente su presión o caudal.

Mecánicamente, los diseños más comunes son de corredera, donde una pieza móvil se desliza para abrir o cerrar pasos, y de obturador, donde un elemento sella directamente contra el asiento de la válvula [19].

Sistema Motor-Bomba

En sistemas de distribución de fluidos, el conjunto motor-bomba actúa como el actuador primario para impartir energía al fluido. Un motor eléctrico, típicamente del tipo asíncrono trifásico de jaula de ardilla por su robustez y bajo mantenimiento [18], proporciona la energía mecánica.

La bomba es una máquina hidráulica que recibe esta energía y la cede al líquido para transportarlo, aumentando su presión, su velocidad o ambas [19, 20]. En el contexto de este

proyecto, nos referiremos a este conjunto como electrobomba. Sus componentes críticos incluyen (ver figura 4):

1. Carcasa: Generalmente de hierro fundido, bronce o acero inoxidable, según la corrosividad del fluido.
2. Rodete: El elemento giratorio que imparte energía cinética al fluido; fabricado en materiales similares a la carcasa.
3. Sello Mecánico: Componente vital que evita fugas; requiere del fluido bombeado para su lubricación y refrigeración.
4. Eje Impulsor: Transmite el par motor desde el motor hasta el rodete, fabricado en acero inoxidable para resistir la corrosión [20].

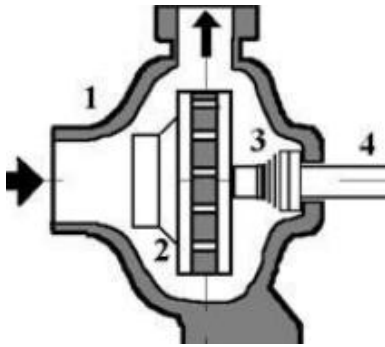


Figura 4. Despiece de una electrobomba típica, mostrando sus componentes fundamentales: 1) Carcasa, 2) Rodete, 3) Sello Mecánico, 4) Eje Impulsor. Este conjunto actúa como el actuador primario del sistema [19, 20].

2. Metodología

El desarrollo del sistema automatizado de distribución hidráulica se llevó a cabo mediante un enfoque sistemático, que incluyó las etapas de diseño, implementación hardware, programación del controlador e integración de la interfaz de supervisión. A continuación, se detalla cada una de estas etapas.

2.1 Diseño del Sistema

Se conceptualizó y diseñó una red de distribución de agua potable de tipo abierta, compuesta por una tubería principal lineal con ramificaciones dirigidas a cuatro tanques de almacenamiento correspondientes a distintas zonas residenciales.

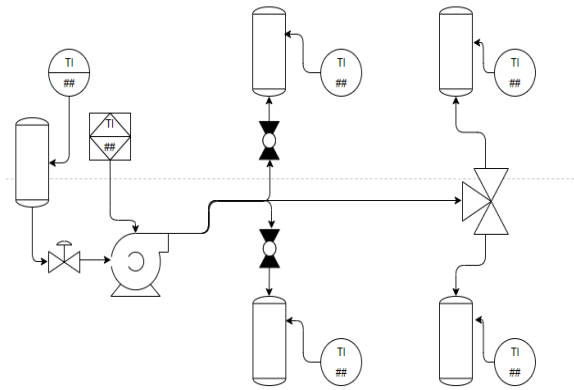


Figura 5. Diagrama de Tuberías e Instrumentación (DTI) del prototipo de red de distribución abierta. Elaboración propia.

La Figura 5 presenta el Diagrama de Tubería e Instrumentación (DTI), que define la ubicación de los componentes principales del sistema: sensores de nivel y presión, válvulas solenoides, bomba principal y tanques. Este diseño garantizó un flujo hidráulico eficiente y estableció los puntos críticos para la medición y el control automático.

2.2 Implementación del Hardware

La arquitectura de control se implementó utilizando componentes de tecnología industrial robustos y compatibles entre sí:

Controlador Principal: Se empleó un controlador de automatización programable (PAC) PACSystems RX3i de GE Fanuc, seleccionado por su capacidad de procesamiento, modularidad y compatibilidad con entornos de programación estandarizados [21].

Interfaz HMI: La supervisión se realizó mediante una HMI desarrollada en el software Cimplicity Workbench, que permite la visualización gráfica en tiempo real, la gestión de alarmas y la interacción operativa.

Sensores: Se instalaron sensores de nivel modelo ZP5210 para monitorizar los volúmenes de agua en los tanques y sensores de presión para medir la presión en la tubería principal.

Actuadores: El sistema incluyó cuatro válvulas solenoides modelo de 12v para regular el flujo hacia cada zona residencial y una electrobomba de 1 hp acoplada a un variador de frecuencia modelo para el control preciso de la presión del agua.

2.3 Programación y Lógica de Control

La lógica de automatización del sistema fue implementada en el Controlador de Automatización Programable (PAC) utilizando el lenguaje de programación *Diagrama Escalera* (Ladder Diagram), conforme al estándar internacional IEC 61131-3. El desarrollo se realizó en el entorno de programación *Proficy Machine Edition*. La estrategia de control integra tres componentes principales:

2.3.1 Secuencia Automática de Llenado por Zonas

Este algoritmo coordina el suministro de agua a las zonas residenciales mediante un ciclo automático basado en un temporizador principal (ACC_TGRAL) y comparadores de rango que activan y desactivan las válvulas solenoides en intervalos temporales predefinidos. La lógica incorpora la lectura de sensores de nivel alto en cada tanque, cerrando la válvula correspondiente al detectar el llenado completo, mientras mantiene el avance del temporizador para conservar la secuencia preestablecida. Adicionalmente, se incluyen periodos de descanso entre zonas para prevenir el funcionamiento continuo de la bomba. El flujo de control de este algoritmo se representa en la Figura 6.

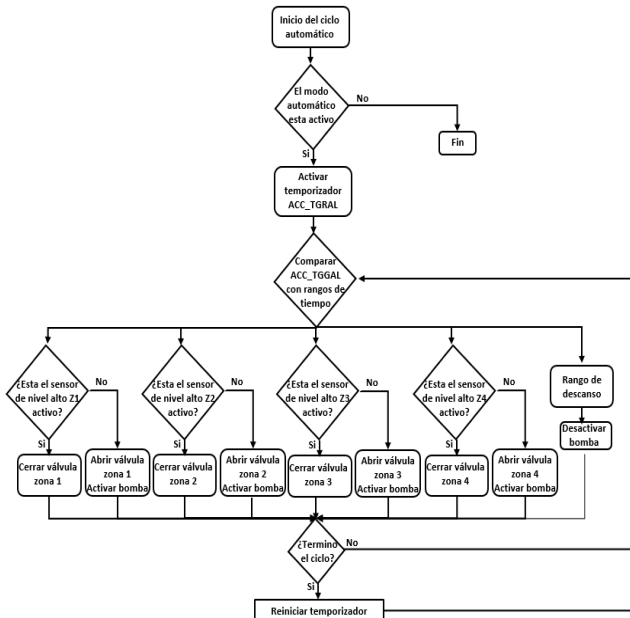


Figura 6. Lógica de control secuencial para el llenado automático de tanques. El algoritmo prioriza la equidad en el suministro y la protección del sistema mediante temporizadores, sensores de nivel y gestión de la electrobomba. Elaboración propia.

2.3.2 Modo Manual

Este modo permite la intervención directa del operador mediante la HMI, facilitando el control individual de válvulas y de la bomba. Al seleccionar una zona, se activa la válvula correspondiente y la bomba por un tiempo máximo configurado de 10 segundos, o hasta que el operador interrumpa la acción manualmente. El diseño incluye temporizadores y señales de reset para asegurar que las operaciones manuales no interfieran con la secuencia automática y evitar activaciones simultáneas no deseadas. Su uso está orientado a tareas de prueba, mantenimiento o situaciones de emergencia. El diagrama de operación en modo manual se detalla en la Figura 7.

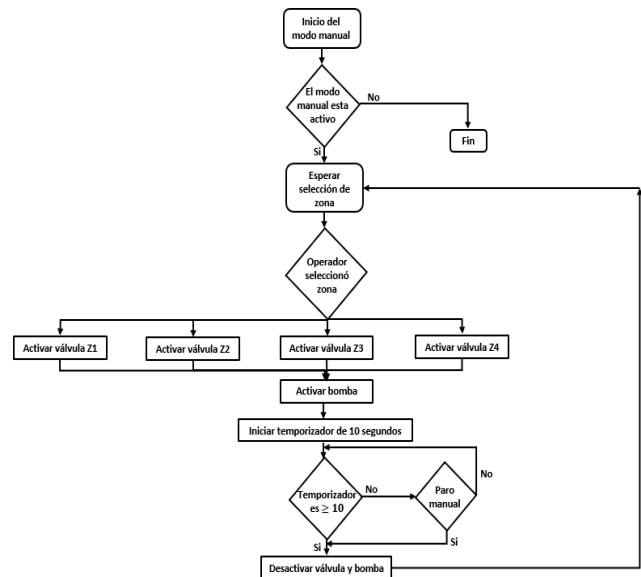


Figura 7. Lógica de control para el modo manual: intervención directa del operador vía HMI para activación temporal de zonas, diseñada para tareas de mantenimiento, prueba o emergencia. Elaboración propia.

2.3.3 Rutinas de Protección

Este módulo supervisa en tiempo real condiciones anómalas como sobrepresión, bajo nivel, paro de emergencia o tiempo excesivo de funcionamiento de la bomba. Al detectar alguna de estas fallas, el sistema ejecuta acciones inmediatas: desactiva la bomba, cierra todas las válvulas y registra el evento en la HMI. Las rutinas de protección tienen prioridad sobre los modos automático y manual, garantizando la integridad del sistema y la seguridad operativa. La secuencia completa de protección se ilustra en la Figura 8.

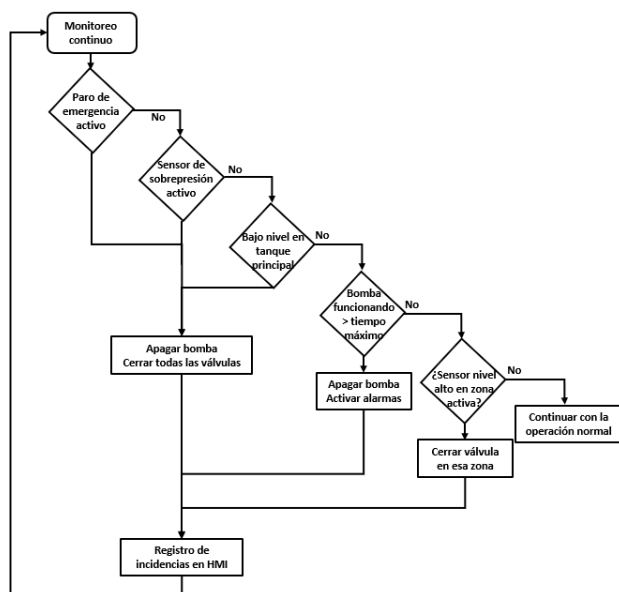


Figura 8. Secuencia de protección de alta prioridad. Ante cualquier falla detectada, el sistema ejecuta una parada segura (bomba + válvulas) y notifica al operador mediante la HMI, garantizando la integridad del sistema. Elaboración propia.

2.4 Interfaz de Supervisión (HMI)

La Interfaz Humano-Máquina (HMI) constituye el componente esencial para la supervisión, visualización e interacción del operador con el sistema automatizado de distribución de agua potable. Desarrollada mediante el software *Cimplicity Workbench* de GE Fanuc, la HMI diseñada permite una gestión integral y en tiempo real del proceso, garantizando una operación eficiente y segura. Las principales funcionalidades implementadas se describen a continuación.

La interfaz principal reproduce de manera gráfica y dinámica el diagrama de tubería e instrumentación (DTI) del sistema (Figura 5). Esta representación visual incluye los elementos clave del proceso: el tanque de suministro, la bomba principal, el variador de frecuencia, los tanques de almacenamiento de cada zona residencial y las válvulas solenoides que regulan el flujo hacia cada zona (Figura 9). Cada componente gráfico se actualiza en tiempo real, reflejando el estado operativo actual (ej., válvula abierta/cerrada, bomba encendida/apagada, nivel de los tanques), lo que facilita una comprensión inmediata del estado global del sistema.

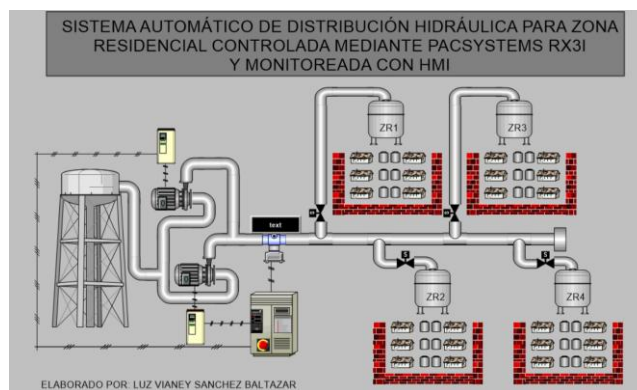


Figura 9. Interfaz principal de la HMI que reproduce dinámicamente el diagrama de tubería e instrumentación (DTI) del sistema. La visualización incluye los componentes clave (tanques, bomba, variador, válvulas) con actualización en tiempo real del estado operativo. Elaboración propia.

También, se implementó un panel de control centralizado (Figura 8) que muestra de forma clara el estado operativo del sistema mediante indicadores visuales (ej., “Sistema Activo”, “Paro de Emergencia”, “Falla”). Adicionalmente, el sistema incorpora un gestor de alarmas que se activa automáticamente ante eventos anómalos, como la detección de niveles fuera de los rangos preestablecidos o fallas en los actuadores. Estas alarmas requieren la atención del operador, registran la incidencia y, en muchos casos, activan respuestas automáticas del controlador para llevar la variable de proceso de vuelta a su set-point, incrementando así la confiabilidad y seguridad del proceso [16, 20].



Figura 8. Vista del panel de control y gestión de alarmas en la HMI. Permite supervisar el estado del sistema y recibir notificaciones inmediatas ante fallas, facilitando una respuesta rápida del operador o acciones automáticas. Elaboración propia.

La HMI incluye una pantalla dedicada a la visualización de gráficas en tiempo real (Figura 9), donde se monitorizan las

variables críticas del proceso, principalmente la presión y el flujo de agua. Estas tendencias permiten analizar el comportamiento dinámico del sistema, comparar la variable de proceso (PV) con el punto de ajuste (SP) y observar la respuesta de la variable controlada (CV). Esta herramienta es fundamental para el análisis del desempeño cuando se implementa un control PID y para la optimización del proceso a través del análisis histórico de datos [16].

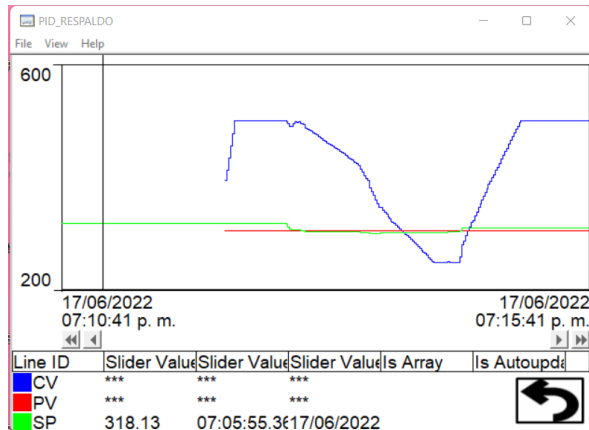


Figura 9. Pantalla de la HMI para visualización de gráficas en tiempo real. Muestra las tendencias de las variables críticas del proceso, permitiendo el análisis del comportamiento dinámico del sistema, la comparación entre la variable de proceso (PV) y el punto de ajuste (SP), y la evaluación del desempeño del controlador.

La interfaz ofrece un acceso granular y seguro a los parámetros de control. Incluye una pantalla de "Selección de zona residencial" (Figura 10) que habilita al operador a intervenir manualmente en la secuencia automática de suministro, seleccionando de forma prioritaria la zona a abastecer. Toda intervención manual está sujeta a protocolos de seguridad, como retardos de confirmación, para evitar transiciones erróneas que puedan afectar la estabilidad del sistema.

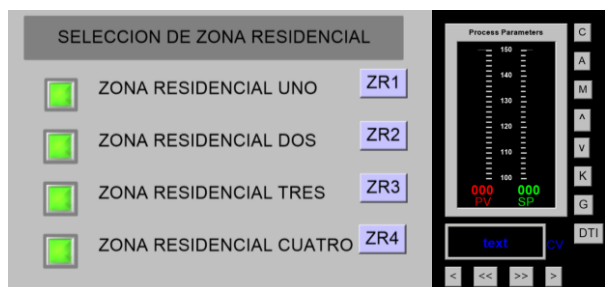


Figura 10. Pantalla de "Selección de zona residencial" en la HMI.

3. Resultados y Discusión

EL prototipo del sistema automático de distribución hidráulica fue construido e implementado exitosamente en escala de laboratorio, con el objetivo de validar el funcionamiento de la lógica de control, la integración hardware/software y la interfaz de supervisión, (Ver figura 11).



Figura 11. Vista general del prototipo del sistema automático de distribución hidráulica implementado a escala de laboratorio.

A continuación, se presentan los resultados obtenidos durante las pruebas piloto, junto con un análisis crítico de su desempeño y limitaciones.

3.1. Desempeño del Sistema en Modo Automático

Durante las pruebas piloto, la secuencia automática de llenado se ejecutó de manera continua y estable a lo largo de múltiples ciclos completos. El algoritmo de control, programado en lenguaje Escalera, gestionó la apertura y cierre de las válvulas solenoides en los intervalos temporales predefinidos, sin presentar fallos de sincronización o bloqueos. La transición entre zonas se realizó de forma ordenada, y el sistema respondió adecuadamente ante la señal de nivel alto en cada tanque, interrumpiendo el llenado de la zona correspondiente sin afectar la secuencia general. Estos resultados demuestran la robustez de la arquitectura basada en PAC para tareas de control cíclico, coincidiendo con lo reportado por [8] respecto a la confiabilidad de los autómatas programables en sistemas de agua. Además, el uso de un PAC permitió una gestión más compleja y flexible que la ofrecida por PLCs tradicionales, facilitando la integración de rutinas de protección y modos operativos avanzados.

3.2. Evaluación del Sistema de Alarmas y HMI

La interfaz HMI demostró ser una herramienta efectiva para la supervisión en tiempo real. Durante las pruebas, se simuló condiciones anómalas como sobrepresión y nivel máximo en tanques, activándose las alarmas correspondientes en un tiempo inferior a 5 segundos. Esta capacidad de diagnóstico inmediato permitió una respuesta rápida por parte del operador, ya sea mediante intervención manual o mediante las acciones automáticas de protección programadas.

Esta funcionalidad es consistente con lo señalado por [6] respecto a que los sistemas SCADA modernos deben reducir drásticamente el tiempo de respuesta ante fallas, facilitando una operación preventiva y minimizando el riesgo de interrupciones prolongadas.

3.3. Análisis Comparativo de Modos de Operación

El sistema permitió una comparación directa entre el modo automático y el manual, destacando las ventajas de cada uno según el contexto operativo. La evaluación de los modos de operación reveló que el modo automático garantizó una operación estable y repetible, ejecutando las secuencias de control sin intervención humana. En contraste, el modo manual demostró ser fundamental para realizar intervenciones específicas, como mantenimiento o la priorización temporal de una zona, subrayando la necesidad de contar con una alternativa de control directo que proporcione flexibilidad operativa ante contingencias.

Esta dualidad operativa coincide con los principios de automatización flexible mencionados por [7], donde la capacidad de alternar entre modos automáticos y manuales sin pérdida de control es clave para la robustez del sistema.

Es crucial reconocer las limitaciones inherentes a este estudio. Si bien el prototipo demostró un desempeño funcional satisfactorio, se trata de un modelo a escala que no replica fielmente la inercia hidráulica, las perturbaciones ni la variabilidad de demanda presentes en una red de distribución real. Asimismo, el número de experimentos realizados, aunque suficiente para validar la funcionalidad básica del sistema, resulta insuficiente para realizar un análisis estadístico robusto de su confiabilidad a largo plazo. Estas limitaciones no invalidan los resultados obtenidos, pero sí subrayan la necesidad de implementaciones futuras a escala real para consolidar las conclusiones presentadas.

3.4. Propuesta Metodológica para Validación y Optimización Futura

Con el fin de superar las limitaciones mencionadas y cuantificar el impacto real del sistema, se propone la siguiente metodología para futuros estudios:

- **Implementación Piloto en Red Real:** Instalación del sistema en un sector acotado de una red municipal, con medición continua de variables clave: presión, flujo, consumo energético y tiempo de respuesta ante fallas.
- **Indicadores de Desempeño (KPIs):** Definición de métricas como:
 - Reducción de tiempo de interrupción del servicio.
 - Disminución de consumo energético (kWh/m³).
 - Porcentaje de reducción de pérdidas de agua.
- **Análisis Comparativo Pre-Post:** Comparación de los indicadores antes y después de la automatización, durante un periodo mínimo de 6 meses.
- **Simulación con Gemelo Digital:** Uso de modelos hidráulicos digitales para extrapolar resultados a redes más grandes y optimizar parámetros de control.

Conclusión

Este trabajo demostró exitosamente la implementación de un sistema de automatización basado en PAC y HMI para la gestión de una red de distribución de agua potable residencial. Los hallazgos principales confirman que: (1) La estrategia de control cíclico automático asegura una distribución equitativa y eficiente, optimizando el consumo energético. (2) La integración de una HMI con capacidades avanzadas de visualización y alarma facilita una supervisión proactiva y reduce el tiempo de respuesta ante fallas. (3) La arquitectura propuesta, aunque conlleva una inversión inicial considerable, presenta un retorno de inversión favorable debido a la reducción de pérdidas de agua y costos operativos. Como trabajo futuro, se propone escalar el sistema a una red mallada para evaluar su desempeño bajo condiciones más complejas, integrar algoritmos de control predictivo para optimizar el consumo energético en tiempo real, y explorar el uso de comunicaciones IoT para el monitoreo remoto. Este estudio sienta una base técnica sólida para la modernización de infraestructuras hidráulicas hacia modelos más inteligentes y sostenibles.

Referencias

- [1] OECD. (2019). Making blended finance work for water and sanitation. OECD Publishing.
- [2] Cabrera, E., Cabrera, E., & Cobacho, R. (2010). Energy audit of water systems. *Journal of Water Resources Planning and Management*, *136*(1), 1-10.
- [3] Fragoso, S. L., & Roberto, R. J. (2016). La sectorización en redes de agua potable para mejorar su eficiencia hidráulica. *Revista Ingeniería Hidráulica y Ambiental*, *37*(2), 116-127.
- [4] Ayamamani García, N. P. (2018). Mejoramiento de la eficiencia hidráulica de la red de distribución de agua potable en la zona Rinconada – Juliaca por el método de la sectorización [Tesis de licenciatura]. Universidad Nacional del Altiplano.
- [5] Aleaga Loaiza, L. F. (2010). Diseño de un sistema de telemetría y telecontrol (SCADA) para la red de distribución de agua potable de la ciudad de Loja [Tesis de maestría]. Universidad de Cuenca.
- [6] Penin Rodríguez, A. (2012). *Sistemas SCADA* (3ª ed.). Marcombo.
- [7] Rivera, D. A., & Zorto Aguilera, J. G. (2010). Sistema SCADA UNAH para eficiencia energética. *Revista Ciencia y Tecnología*, *6*, 97-109.
- [8] García Gómez, A., & Sierra Romero, E. (2009). Automatización de sistemas de agua potable para pequeñas ciudades [Tesis de pregrado]. Universidad Tecnológica de Bolívar.
- [9] Cachumba Simbaña, G. I. (2019). Implementación de un prototipo para el control automático de nivel de agua para tanques de almacenamiento con interfaz HMI [Tesis de ingeniería]. Universidad Israel.
- [10] Blanco, M., López, J., & González, R. (2020). Industry 4.0 in water management: A review. *Water*, *12*(5), 1234. <https://doi.org/10.3390/w12051234>
- [11] Boulos, P. F. (2020). Digital twins for water distribution systems. *Journal of Hydroinformatics*, *22*(2), 123-135. <https://doi.org/10.2166/hydro.2020.100>
- [12] Vera Pereyra, D. M. (2018). Evaluación del comportamiento hidráulico de métodos computacionales convencionales en el Distrito de Chupaca [Tesis de ingeniería]. Universidad Nacional del Centro del Perú.
- [13] GE Fanuc. (2006). *Proficy HMI/SCADA – CIMPPLICITY* [Manual]. GE Industrial Systems.
- [14] Guitierrez, M., & Iturralde, S. (2017). *Fundamentos básicos de instrumentación y control*. Universidad Peninsular Estatal Santa Elena.
- [15] Aguilar-López, R., Alvarado-Santos, E., Thalasso, F., & López-Pérez, P. A. (2024). Monitoring ethanol fermentation in real time by a robust state observer for uncertainties. *Chemical Engineering & Technology*, *47*(5), 779-790. <https://doi.org/10.1002/ceat.202300456>
- [16] Alvarado-Santos, E., Mata-Machuca, J. L., López-Pérez, P. A., Garrido-Moctezuma, R. A., Pérez-Guevara, F., & Aguilar-López, R. (2022). Comparative analysis of a family of sliding mode observers under real-time conditions for the monitoring in the bioethanol production. *Fermentation*, *8*(9), 446. <https://doi.org/10.3390/fermentation8090446>
- [17] De la Espriella-Babiloni, A. (2019). Comparación entre tecnologías emergentes y tradicionales en automatización e instrumentación. Universidad Tecnológica de Bolívar.
- [18] SEO "Instrumentación y control". (2020). Componentes de las electroválvulas y su funcionamiento. Refacalderas.
- [19] Vigo, R. (2017). *Información técnica III: Válvulas y electroválvulas*. Rodavigo S.A.
- [20] Camargo, H. R. (2020). Diseño de un sistema de control para el monitoreo de la temperatura de un motor de bomba de agua de 0.75 kW [Tesis de ingeniería]. Universidad Continental.
- [21] Emerson. (2019). *PACSystems RX3i system manual*. GE Automation & Controls.

Haga clic o pulse aquí para escribir texto.