

AUTOMATIZACIÓN DIRIGIDA POR MODELO DE UN SISTEMA DE TRATAMIENTO DE AGUA PARA CALIBRACIÓN DE MEDIDORES MAGNÉTICOS

Sandra A. Víctor Chávez¹, José E. Acosta Cano de los Ríos²

¹ FR-Tecnologías de Flujo – EMERSON- ²Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico de Chihuahua / División de Estudios de Posgrado e Investigación

RESUMEN

Se presenta el desarrollo de un sistema automatizado de tratamiento de agua para un laboratorio de calibración de caudalímetros electromagnéticos. La lógica de operación del controlador (PLC) es presentada en forma de grafo iMRP, para su operación dirigida por modelo. El método de calibración gravimétrico empleado exige características específicas: agua limpia, con conductividad y temperatura controladas, viscosidad, etc. lo que implica reemplazar regularmente dicha agua por degradación de calidad, afectando tiempos, costos, precisión y el ámbito ambiental. Lo aquí propuesto integra sensores para monitorear en tiempo real la calidad, niveles y parámetros críticos del agua, con el objetivo de prolongar su vida útil, reducir paros de producción y asegurar la trazabilidad y cumplimiento normativo en la calibración.

Palabras Clave: Automatización, operación dirigida por modelo, tratamiento de agua, caudalímetros electromagnéticos.

ABSTRACT

The development of an automated water treatment system for an electromagnetic flowmeter calibration laboratory is presented. The PLC operating logic is presented in the form of an iMRP graph in order to be executed as model based operation. The gravimetric calibration method employed requires specific characteristics: clean water with controlled conductivity, temperature, viscosity, etc. This requires regular water replacement due to quality degradation, affecting time, costs, accuracy, and the environmental impact. The proposed system integrates sensors to monitor water quality, levels, and critical parameters in real time, with the goal of extending its useful life, reducing production downtime, and ensuring traceability and regulatory compliance during calibration.

Keywords: Automation, water treatment, electromagnetic flow meters.

INTRODUCCIÓN

El agua es un recurso esencial en los procesos industriales, utilizada como materia prima, medio de transporte, refrigerante y agente de limpieza, cuyas exigencias de calidad varían según la aplicación. El tratamiento de agua industrial resulta fundamental para asegurar la calidad del producto final, la eficiencia de los equipos y la sostenibilidad de las operaciones. Los avances en tecnologías de monitoreo, controladores lógicos programables (PLC) y sistemas SCADA han permitido automatizar estos procesos, posibilitando el monitoreo en tiempo real de parámetros críticos (pH, temperatura, conductividad, turbidez), la optimización en el uso de insumos y energía, así como una mayor trazabilidad y cumplimiento normativo.

Los medidores de flujo electromagnéticos se emplean ampliamente para medir el caudal en líquidos conductivos, siendo el agua el fluido de referencia más utilizado. Su principio de funcionamiento se basa en la ley de Faraday de inducción electromagnética, en la que el paso de un fluido conductor a través de un campo magnético genera un voltaje proporcional a su velocidad. Para garantizar la precisión y trazabilidad de estos instrumentos, se requiere su calibración con fluidos de referencia de propiedades físico-químicas estables, homogéneas y bien caracterizadas; sin embargo, solo el agua que cumple estrictas especificaciones es apta para este propósito.

Es por ello que automatizar un sistema de tratamiento de agua que proporcione una retroalimentación en tiempo real del estado del agua y que además se auto-regule para mantener las condiciones óptimas es fundamental para este proyecto teniendo como base principal una arquitectura modular y de acoplamiento débil.

MARCO TEÓRICO

2.1. Antecedentes

El agua es un recurso indispensable en procesos industriales, utilizado en diversas funciones como materia prima, transporte y refrigeración, cuyas especificaciones de calidad dependen de la aplicación

particular (Spellman, 2017; Metcalf & Eddy, 2014). En el contexto de la calibración de medidores de flujo electromagnéticos, la empresa FR Tecnologías de Flujo (Emerson Group) emplea agua como fluido de referencia, requiriendo propiedades físico-químicas estables para garantizar la precisión y trazabilidad metrológica. Estos medidores operan bajo el principio de inducción electromagnética de Faraday, donde la conductividad del agua es crítica para la generación de señales fiables.

2.1. Tratamiento de agua.

El tratamiento de agua industrial se fundamenta en etapas físicas, químicas y biológicas, tales como filtración, intercambio iónico, ósmosis inversa, electrodiálisis y coagulación (Droste & Gehr, 2018). Para el correcto funcionamiento y calibración de los medidores magnéticos, el agua debe poseer conductividad eléctrica adecuada (5–1500 $\mu\text{S}/\text{cm}$), estabilidad térmica (10–40 °C), homogeneidad del flujo libre de turbulencias y partículas, así como compatibilidad química que evite agentes corrosivos y alteraciones en los electrodos (Krohne Group, 2020; OIML, 2013). La conductividad depende de la concentración de iones disueltos y temperatura, mientras que la viscosidad del agua influye en la dinámica del flujo.

2.2. Plataformas de automatización

La automatización en sistemas de tratamiento de agua ha evolucionado con la incorporación de sensores inteligentes, PLCs y plataformas SCADA, posibilitando monitoreo en tiempo real de parámetros críticos como pH, temperatura y conductividad, optimizando consumo energético y de reactivos, mejorando la trazabilidad y cumplimiento normativo (Gupta & Agrawal, 2018; AWWA, 2012). Entre las plataformas avanzadas destaca PACSystems de Emerson, un controlador de automatización programable (PAC) que combina robustez y capacidad de procesamiento en tiempo real, integrando conectividad IIoT, redundancia, computación en el borde (edge computing) y entornos de programación unificados, apto para controlar equipos y procesos complejos en plantas de tratamiento (Emerson, 2022).

2.3. Arquitectura de sistemas automatizados

Un sistema típico de automatización para tratamiento de agua se estructura en tres niveles:

- Nivel de campo: sensores, actuadores y dispositivos de medición que recogen datos del proceso.

- Nivel de control: PLCs o sistemas distribuidos (DCS) que procesan datos y ejecutan acciones.
- Nivel de supervisión: interfaces hombre-máquina (HMI) y sistemas SCADA para visualización, análisis y ajustes globales (Corominas, 2009).

Esta arquitectura modular facilita la escalabilidad, adaptabilidad y trazabilidad operativa. Además, conceptos avanzados como el esquema de Acoplamiento Débil (Acosta, 2015), Fig. 1, propone metodologías flexibles para la integración de sistemas informáticos y equipos de producción, utilizando operación dirigida por modelo facilitando así la reutilización y adaptación a entornos industriales dinámicos.

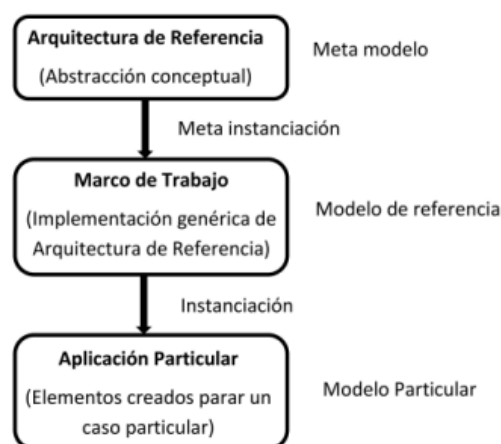


Figura 1. Estructura de ArquiTAM para el desarrollo y aplicación del sistema (Acosta, 2015)

3. DESARROLLO

Para el desarrollo se optó por un tratamiento de agua de varias etapas que fuera capaz de auto mantenerse ya se activándose ciertas etapas para censar y controlar únicamente cuando fuese necesario, para lo cual se seleccionó la siguiente instrumentación en la que no se agregan características críticas ya que el proyecto está planeado para que se pueda instalar en cualquier laboratorio de calibración o planta de manufactura, por lo que los modelos variarían de acuerdo a la capacidad requerida dando la opción así de ajustarlo a cualquier aplicación particular, Tabla 1:

Tabla 1. Instrumentación.

INSTRUMENTO	FUNCION
BOMBA DE AGUA	Extrae el agua del aljibe

LAMPARA UV	Desinfecta el agua eliminando microorganismos con el uso de luz ultravioleta
SENSOR DE FLUJO	Mide el flujo de agua que pasa a través de la tubería. Entrada y salida
SENSOR DE CONDUCTIVIDAD	Verifica que el agua tenga conductividad
FILTRO DE SOLIDOS	Filtra los sólidos que se encuentren en el agua
FILTRO DE AGUA	Filtra los sólidos más diminutos que se encuentren en el agua
VÁLVULAS ELECTRONEUMÁTICAS	Regula y controla el flujo de agua de forma automática
MEDIDOR DE PRESIÓN	Mide la presión en distintos puntos del sistema
TANQUE DE SALES	Trabaja en conjunto con el tanque de suavizado, se utiliza para producir una solución de salmuera que trata el agua dura
TANQUE DE SUAVIZADO	En este punto se suaviza el agua, eliminando el calcio y magnesio, evitando la formación de sarro en superficies, tuberías y equipos
SENSOR/ CONTROLADOR	Medir y Transmitir señales de flujo
CONTROLADOR LÓGICO PACSYSTEM RSTI-EP	PLC seleccionado para operar el tratamiento de agua
VARIADOR DE FRECUENCIA	Se encarga de controlar la bomba que recircula el agua al tratamiento de agua

Tabla 1. Instrumentación (Cont'n).

Se establecieron las etapas y secuencias del proceso mediante la disposición estratégica de sensores, válvulas y equipos de tratamiento de agua en puntos críticos, con el propósito de habilitar la recirculación automática hacia etapas específicas cuando fuera necesario, o bien permitir la continuidad del flujo para su uso en procesos de calibración.

Para la integración y control del sistema se seleccionó un equipo de automatización de la compañía Emerson, dado que el proyecto contemplaba como restricción principal priorizar el uso de instrumentación de esta marca, lo cual además permitía emplear el prototipo como demostración para futuros clientes. Tras el análisis del portafolio disponible, se eligió el PACSystems RSTi-EP CPE205, debido a su elevado desempeño en

un formato compacto y rentable, la compatibilidad con el entorno de desarrollo de los PLCs de mayor capacidad de Emerson, y sus características de seguridad integrada, programación con estándares abiertos, capacidad de comunicación y soporte para hasta 8 dispositivos PROFINET, 512 entradas/salidas digitales y 128 analógicas Fig. 3.

Adicionalmente, se incorporaron otros dispositivos Emerson, tales como sensores de presión, flujo, temperatura y conductividad, además de válvulas, variadores de frecuencia y una interfaz HMI.

En la etapa inicial se crearon los registros de entradas y salidas, teniendo como principio un modelo de referencia genérico sin llegar a un modelo particular, para poder de esta manera acoplarlo en un futuro a otras áreas si así se requiriera. Se escalaron las señales analógicas dando de alta los componentes y variables en el "Machine edition" del PLC. Como se muestra en la figura 2:

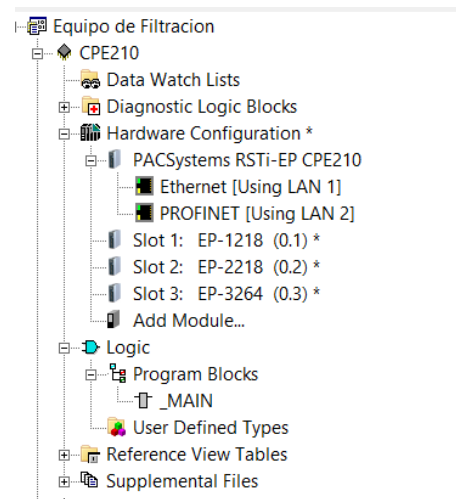


Figura 2. Registro valores en PLC

Se decidió instalar un gabinete para el control incluyendo en su interior un variador de frecuencia de la misma marca Emerson modelo MS300 / 3.7KW / 5HP / 460V esto en base a la dimensión del motor seleccionado. La lógica de control implementada consistió en establecer límites de operación para cada variable monitorizada, de manera que el sistema pudiera accionar automáticamente el motor para la extracción de agua, así como abrir o cerrar válvulas con el fin de recircular el fluido o retornarlo al aljibe. Gracias a la interfaz HMI, el usuario dispone de distintos modos de operación:



Figura 3. Gabinete eléctrico en proceso de conexión.

Acto siguiente se procedió a realizar los diagramas eléctricos e instrumentación, Fig. 4, para cablear potencia y control, a la par se fueron etiquetando entradas y salidas a clemas y relevadores, y como paso final a elementos periféricos del gabinete.

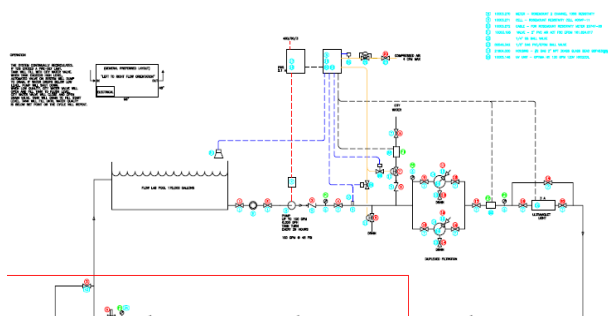


Figura 4. Diagrama de flujo instrumentado

Modo automático: el sistema ejecuta el monitoreo integral y realiza un ciclo completo de tratamiento. Antes de enviar el agua al retorno, verifica su calidad y determina la necesidad de repetir etapas en función de los datos obtenidos por los sensores.

Modo manual: el sistema opera en ciclos completos, pero únicamente genera alarmas cuando alguna de las variables críticas se encuentra fuera de los parámetros establecidos.

Modo de retro lavado y mantenimiento: el operario selecciona manualmente las etapas a ejecutar para realizar acciones preventivas o correctivas. El estado de la mayoría de los equipos puede diagnosticarse mediante los sensores, sin embargo, algunos dispositivos, como la lámpara UV, requieren seguimiento adicional basado en el tiempo de uso debido a su vida útil limitada.

Como parte del proyecto se elaboró un procedimiento de mantenimiento preventivo, el cual será definido y ajustado progresivamente en función de las necesidades operativas del sistema. En esta fase se estableció un enfoque específico a una aplicación particular, considerando que la sustitución de componentes — como la resina del tanque suavizador, las sales regenerantes y los filtros de sólidos— dependerá directamente de las condiciones particulares del agua tratada y de la eficiencia global del sistema de tratamiento.

Adicional en la pantalla principal del HMI se mostrarán los valores principales del estado del agua en el aljibe, el status de operación y alarmas de presión y nivel en puntos clave del proceso, Fig. 5.

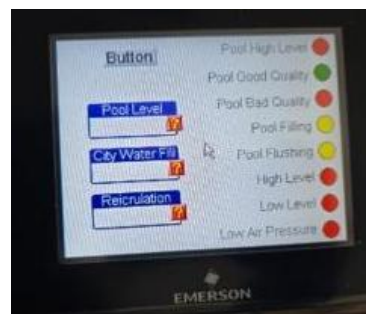


Figura 5. HMI Touch en pantalla de alarmas.

3.1. Operación Dirigida por Modelo,

Con la finalidad de facilitar la programación (y reutilización) del sistema se propone la implementación del sistema de control con base en la técnica propuesta en [Acosta et al., 2022] como operación dirigida por modelo. Con tal finalidad se presenta el modelo de particularidades (iMRP), Fig. 6.

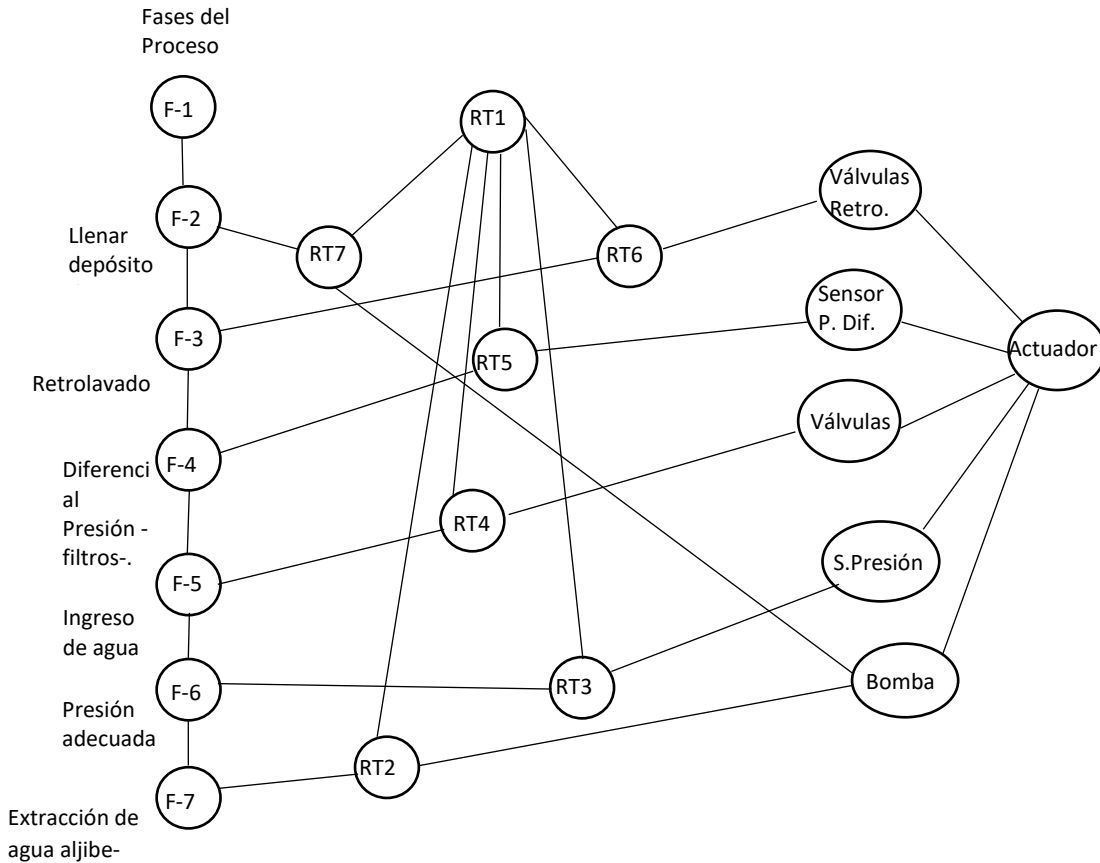


Figura 6. Modelo de particularidades del Sistema (iMRP)

El proceso inicia con la extracción de agua del aljibe. Mediante un sensor de presión se monitorea que se alcance un umbral mínimo determinado. La siguiente fase consiste en abrir las válvulas de ingreso de agua hacia el sistema de tratamiento, en donde inicia el proceso de filtración. El agua es conducida a través de un sistema de dos filtros físicos para remover partículas suspendidas y sólidos mayores. Se mide la diferencia de presión. Si se detecta un filtro obstruido, el PLC activa automáticamente la fase de auto lavado mediante la apertura de válvulas específicas y la inversión de flujo durante un tiempo determinado.

Como se reporta en (Acosta, et al. 2022), el grafo iMRP y la programación de la operación de cada uno de los objetos Actuador permiten adaptar el sistema genérico a diferentes casos especiales. Reduciendo el esfuerzo de programación significativamente. Por ejemplo, la programación de la operación del Objeto Actuador Sensor de Presión (S. Presión), que consiste en medir la presión para la apertura de las válvulas, -Objeto

Actuador Válvulas. En este caso el código para la operación del Objeto Actuador Válvulas, pudiera ser escrito de la siguiente manera:

CASE RTID OF

```
...
//actuador S. Presión
3: IF bSensorPresión=FALSE THEN //Nivel de
presión no alcanzada.
    bVálvulaAbrir:=FALSE;
//Permanecer cerrada la válvula
    bFinOp:= FALSE;
    bEnOp:= TRUE;
ELSE //Nivel de presión alcanzado
    bVálvulaAbrirF:=TRUE; //Abrir
válvulas
    bFinOp:= TRUE;
    bEnOp:= FALSE;
END_IF
...
END CASE
```

Es importante destacar que gran parte de la lógica (secuencia) de operación del sistema se encuentra abstraída en el modelo gráfico de particularidades (iMRP), que a su vez es interpretado por el sistema genérico (interprete de grafos). De esta manera se simplifica la realización de cambios en la operación del sistema. Así mismo, el desarrollo del programa para nuevas aplicaciones del sistema genérico es simplificado significativamente.

4. CONCLUSIONES

Es posible implementar un sistema de tratamiento de agua diseñado específicamente para un laboratorio de calibración de medidores magnéticos cumpliendo con las características y especificaciones de calidad del agua requeridas para dicho proceso. La automatización es posible siguiendo una arquitectura de 3 niveles: campo, control y supervisión, siguiendo una estructura de acoplamiento débil para tener la posibilidad de adaptar el programa a otro sistema de producción con requerimientos similares.

REFERENCIAS

[1] Spellman, F. R. (2017). *Water & wastewater treatment: A guide for the nonengineering professional* (2nd ed.). CRC Press.

[2] Metcalf & Eddy, Inc. (2014). *Wastewater engineering: Treatment and resource recovery* (5th ed.). McGraw-Hill Education.

[3] Droste, R. L., & Gehr, R. (2018). *Theory and practice of water and wastewater treatment* (2nd ed.). Wiley.

[4] Krohne Group. (2020). *Electromagnetic Flowmeters: Principles and Applications* [Technical documentation]. <https://www.krohne.com>

[5] OIML. (2013). R 49-2: Water meters for cold potable water and hot water—Part 2: Metrological and technical requirements. International Organization of Legal Metrology.

[6] Gupta, S., & Agrawal, R. K. (2018). Automation of water treatment plant using PLC and SCADA. *International Journal of Advanced Research in Electrical, Electronics and Instrumentation Engineering*, 7(2), 821–827.

[7] American Water Works Association (AWWA). (2012). *Water quality and treatment: A handbook on drinking water* (6th ed.). McGraw-Hill Education.

[8] Emerson. (2022). *PACSystems: Advanced control solutions for water and wastewater automation*. Emerson Electric Co. <https://www.emerson.com/en-us/automation/pacsystems>

[9] Corominas, J. (2009). Automatización de procesos en ingeniería ambiental. En *Gestión y tratamiento de aguas residuales industriales* (pp. 231–260). Ediciones Díaz de Santos.

[10] Acosta Cano de los Ríos, José E. (2016). *Esquema de Referencia para Acoplamiento Débil entre Sistema Informático y Equipo de Producción*. Thesis (Doctoral), E.T.S.I. Industriales (UPM). <https://doi.org/10.20868/UPM.thesis.39360>.

[11] Acosta Cano de los Ríos, J.E., Ronquillo Tercero, M-H., Chavez Lopez, O.A. (2022). Operación dirigida por modelo en sistemas basados en PLC. *Revista Indizada ISSN: 1405-2172. Congreso Internacional de Ingeniería Electrónica . Memoria Electro. Chihuahua, Chih. Octubre de 2022. Vol. 44. No. 1. pp. 14-20.*