

Sistemas Distribuidos y Basados en Conocimiento para el Monitoreo y Control en el Tratamiento de Aguas Residuales

Oscar Mauricio Mendoza[†], Jackson Rodriguez, Bernd Friedrich
IME Instituto de Procesos Metalúrgicos y Reciclaje de Metales – Universidad RWTH Aachen, Alemania

Resumen — El control en tiempo real de las plantas de tratamiento de aguas residuales representa un problema complejo debido a la carencia de instrumentación en línea que permita realizar acciones preventivas y correctivas con la rapidez necesaria. La existente relación e interdependencia entre los diferentes procesos de los sistemas de tratamiento de las aguas residuales ha demostrado la necesidad de generar plataformas interactivas. Debido a esto, la implementación de sistemas distribuidos en el tratamiento de las aguas residuales se hace cada día más importante. Así mismo, el uso de sensores en línea, como el implementado en la automatización de la electrocoagulación en IME, combinado con el uso de los sistemas distribuidos, debe estar soportado por un sistema de toma de decisiones confiable. Los sistemas basados en conocimiento son una excelente opción para la implementación de toma de decisiones en el control de procesos automatizados. En este artículo se hará una breve introducción a los sistemas distribuidos y los sistemas basados en conocimiento y se presentarán algunas de las posibles aplicaciones para el monitoreo y control de los procesos de tratamiento de las aguas residuales.

Palabras clave — Control en tiempo real, monitoreo en línea, protección del medio ambiente, sistemas distribuidos y basados en conocimiento, tratamiento de aguas residuales.

I. INTRODUCCIÓN

El ciclo del agua, mostrado en la Fig. 1, pone en evidencia el algo grado de interconexión entre los diferentes puntos por los cuales el agua circula, ya bien sea en su proceso de circulación natural o en el proceso de circulación en el que el hombre interviene. Las actividades antropogénicas en el ciclo natural del agua han generado diversos problemas a nivel mundial, como por ejemplo, la escasez de fuentes de agua potable debido al uso desmesurado o al vertimiento de sustancias que las contaminan, haciéndolas no aptas para el consumo humano.

En la actualidad, el agua es utilizada con diversos fines, bien sea para el consumo doméstico, para la agricultura o para los procesos industriales, y de la misma manera, diferentes formas de contaminación se presentan en las aguas residuales.

Sin embargo, como se describe en este ejemplo, no existe una diferenciación en los puntos de recolección del agua o en los sitios de vertimiento después de su utilización y tratamiento. De la misma forma, los sistemas de alcantarillado combinados que se utilizan para realizar todas las descargas del agua después de su uso están interconectados, lo cual hace que las plantas de tratamiento de agua no puedan distinguir de dónde provienen los efluentes que se están recibiendo, ni tampoco el tipo de contaminación que éstas contienen.



Fig. 1. Ciclo del agua bajo la influencia antropogénica

Debido a esta interconexión, a la alta complejidad del proceso de tratamiento de aguas residuales y al alto riesgo inherente en caso de una falla durante dicho proceso, se hace necesario la creación e implementación de nuevos mecanismos de monitoreo y control en el tratamiento de aguas residuales que permitan tomar acciones preventivas y correctivas en el momento adecuado y con la rapidez necesaria.

[†] Autor al que se le dirige la correspondencia:
Tel. (+49) 241 80 90237. Fax (+49) 241 80 92154.
E-mail: Oscar.Mendoza@rwth-aachen.de

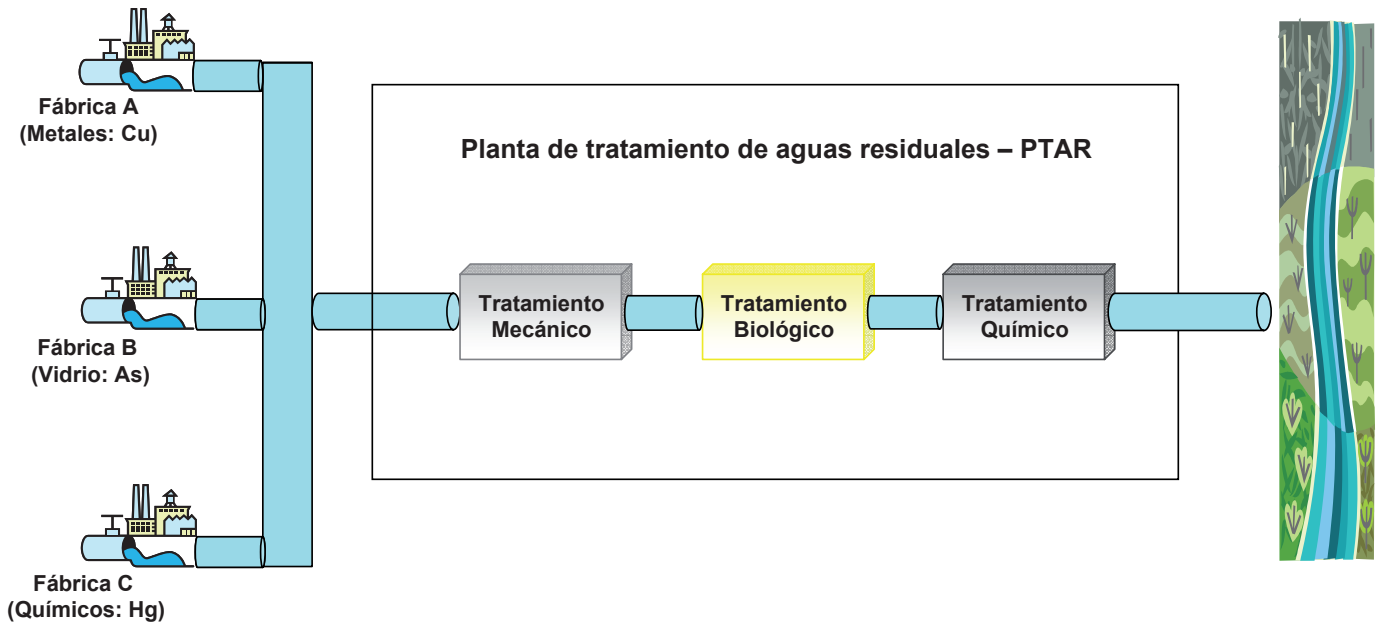


Fig. 2. Interconexión actual entre industrias y las plantas de tratamiento de aguas residuales PTAR

II. USO DE LOS SISTEMAS DISTRIBUIDOS

Desde el punto de vista informático, la imagen introducida en la Fig. 1 puede ser vista como un sistema distribuido, el cual la tecnología de la información lo describe como una colección de computadores independientes que aparecen ante los ojos del usuario como un sistema único cohesionado.

Si cada terminal de este ejemplo que se encuentra unido por los canales de distribución o de descarga del agua es visto como un computador, y si esos canales de distribución o de descarga son vistos como un medio de interconexión y transmisión, se puede entender claramente la analogía que existe una entre los sistemas de tratamiento de las aguas residuales y los sistemas informáticos distribuidos.

Sin embargo, el presente artículo solo se centrará en hacer esta analogía para la interconexión existente entre industrias y plantas de tratamientos como se presenta en Fig. 2. Bajo este esquema existen entidades gubernamentales encargadas de controlar y supervisar los niveles de contaminación en el agua y los mecanismos de limpieza que realizan las industrias para descontaminar sus efluentes antes de enviarlos a las plantas de tratamiento. En la actualidad, este control y supervisión es realizado mediante auditorías que las fábricas realizan ante las autoridades ambientales.

Estas entidades gubernamentales a su vez difunden esta información a las plantas de tratamiento de aguas residuales, con el fin de llevar un registro de los niveles de contaminación que sobrepasen los requisitos preestablecidos. Sin embargo esta comunicación no se realiza en línea y en muchos casos es llevada a cabo por medio de mecanismos asíncronos. Estos mecanismos generan como consecuencia que las acciones correctivas sean tomadas demasiado tarde cuando una eventual contaminación en el agua residual ya ha contaminado los recursos hídricos.

El retraso en la ejecución de acciones correctivas no se debe únicamente al envío asincrónico de la información, es también una consecuencia de los métodos utilizados para monitorear los niveles de contaminación y transmitir dicha información. Los métodos actuales implican pruebas de laboratorio en las cuales pequeñas cantidades de agua son analizadas para determinar sus niveles de contaminación.

Sensores como el diseñado en el IME en el marco de la cooperación académica con la Facultad de Ingeniería Electrónica de la Universidad Pontificia Bolivariana, son una excelente solución para poder realizar el monitoreo de los niveles de contaminación del agua en tiempo real. Adelantos tecnológicos en este tipo de sensores abren una ventana de oportunidad para realizar también adelantos tecnológicos en la manera como se recolectan, transmiten y procesan los datos generados por estos sensores.

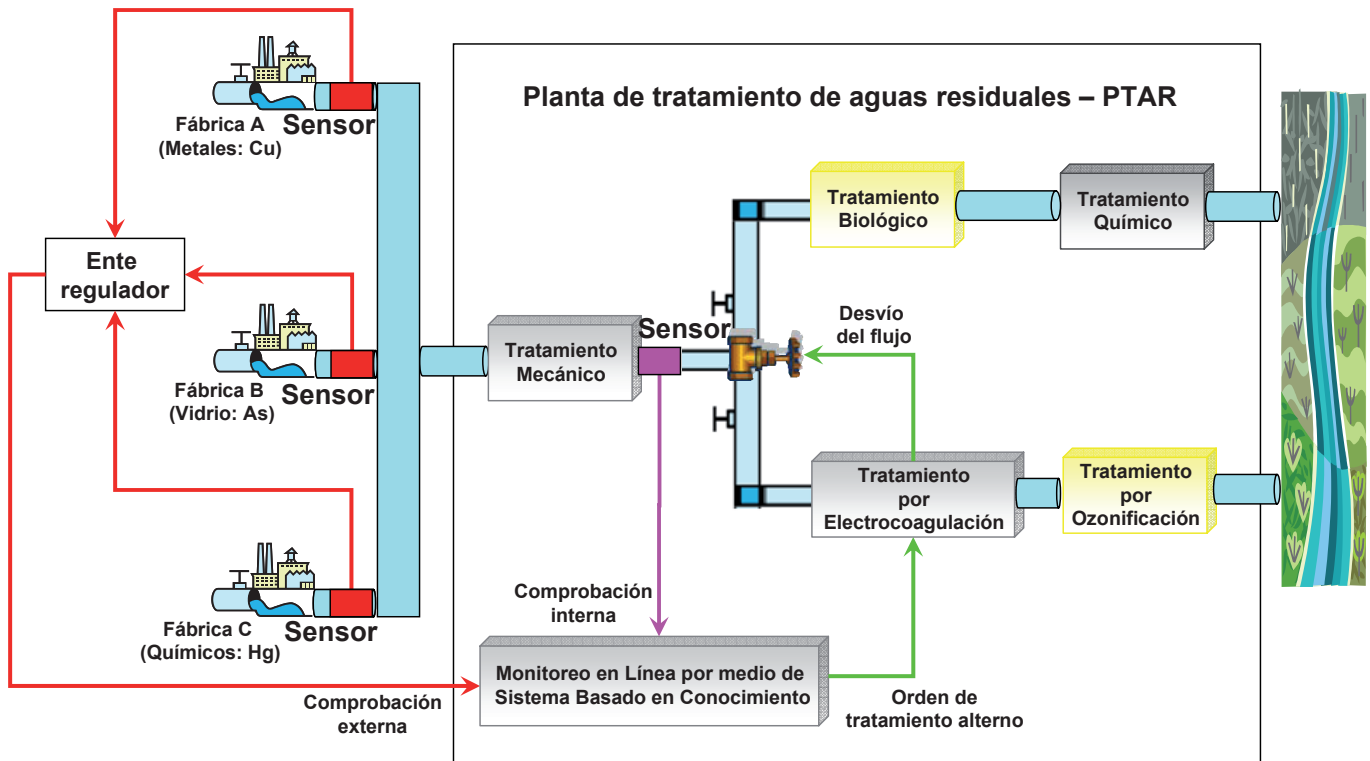


Fig. 3. Arquitectura propuesta para la interconexión entre industrias y PTAR a través de un ente regulador

De esta manera Fig. 3, presenta la arquitectura propuesta donde se propone el diseño de una arquitectura computacional basada en sistemas distribuidos en la cual, se hace uso de sensores para la detección de contaminantes presentes en las aguas residuales. En ella, cada fábrica o industria hace uso de sensores para medir en tiempo real el nivel de contaminación del efluente industrial que está siendo transportado a la planta de tratamiento de aguas residuales PTAR. Los datos generados por estos dispositivos son enviados constantemente a un ente regulador donde un algoritmo se encarga de comparar y evaluar si todos los niveles de contaminación cumplen las reglamentaciones gubernamentales. Si alguno de los niveles de contaminación sobrepasa los niveles establecidos en la reglamentación, una señal de alarma es enviada automáticamente a la planta de tratamiento de agua residual, donde un sistema basado en conocimiento (ver sección III) se encargará de tomar las acciones respectivas. En este caso, se desvía el flujo del tratamiento del agua después de haber realizado el tratamiento mecánico para comenzar a realizar un tratamiento alternativo adecuado para la remoción de estos contaminantes,

como el propuesto en IME utilizando un tratamiento electroquímico conocido como la electrocoagulación. Puesto que el tratamiento por electrocoagulación sólo es efectivo en un 50% para la remoción de cargas biológicas, un post-tratamiento con ozono debe ser implementado para reducir la demanda química de oxígeno y otras cargas orgánicas en el agua electrocoagulada a los niveles requeridos para efectuar finalmente la descarga al medio ambiente.

Por razones de confiabilidad y respaldo del sistema, sensores para la detección de diversos tipos de contaminantes debe ser así mismo instalado en el punto de recepción de aguas residuales en la planta de tratamiento, esto con el fin de asegurar que la planta de tratamiento pueda detectar por sí misma una posible emergencia aún si esta no fue detectada por la fábrica o si hubo algún fallo en la comunicación entre el ente regulador y el sistema basado en conocimiento. Una vez que los sensores instalados en la planta de tratamiento detecten que los niveles de contaminación del agua que está siendo recibida en la planta son los normales, el sistema basado en conocimiento podrá determinar si la planta puede volver a operar con su flujo de tratamiento habitual.



Fig. 4. Arquitectura del sistema de supervisión y control basado en conocimiento para PTARs.

La instalación de sensores en cada una de las fábricas permitiría así mismo tomar acciones correctivas en el lugar donde se genera el problema. Si la fábrica puede detectar en tiempo real que se ha presentado una falla en su proceso de tratamiento interno del agua residual antes de realizar la descarga a la red de alcantarillado, es posible que ésta pueda tomar acciones correctivas inmediatamente y así disminuir el impacto ambiental. Esto puede llegar incluso a afectar los procesos biológicos de la planta de tratamiento de aguas residuales donde por la infraestructura actual que estas poseen (ver Fig. 2), no están en capacidad de realizar la remoción de cargas que no sean de tipo orgánico (DQO, TOC, TNb).

Bajo este esquema, gran parte de la recolección de datos, su procesamiento y la toma de acciones correctivas han sido distribuido entre los diferentes actores del proceso (e.g. fábricas, ente regulador y planta de tratamiento). Sin embargo, al aumentar el número de datos recolectados se aumenta también la complejidad de su procesamiento, lo cual requiere una nueva forma de extraer información de los datos y así poder tomar decisiones acertadas. Es por eso que un sistema basado en conocimiento debe ser implementado en la planta de tratamiento de agua residual para completar la optimización del proceso.

III. USO DE SISTEMAS BASADOS EN CONOCIMIENTO

Un sistema basado en conocimiento es un sistema computacional programado para imitar la resolución de problemas del ser humano por medio de mecanismos de inteligencia artificial y haciendo referencia a bases de datos de conocimientos en un tema en particular. Esta definición permite pensar que un sistema basado en conocimiento puede ser el encargado del análisis los datos recibidos en la planta de tratamiento y la extracción de la información relevante, y basado en su propia inteligencia tomar las decisiones necesarias para regular su operación.

Un sistema basado en conocimiento permite hacer uso de la experiencia y el conocimiento de los operarios de la planta de tratamiento de aguas residuales y realizar una toma de decisiones automatizada. Un gran número de proyectos en automatización han demostrado las ventajas que éstos poseen. Sin embargo, uno de los mayores retos al momento de implementar un sistema basado en conocimiento radica precisamente en obtener el conocimiento y la experiencia necesarios para representarlos en el sistema y hacer un uso eficaz de ellos. Hasta este momento muy pocos proyectos de investigación en el desarrollo de sistemas basados en conocimiento para la supervisión y control de plantas de tratamiento de aguas residuales han sido implementados.

En el trabajo realizado por [1], una arquitectura de hardware y software fue desarrollada y se implementó un sistema de control distribuido y basado en conocimiento para la supervisión de una planta piloto de tratamiento de aguas residuales con remoción biológica de material orgánico, nitrógeno y fósforo. Una característica importante del sistema implementado es la supervisión que realiza cada proceso de los elementos situados jerárquicamente bajo su control y aunque esto aumenta la complejidad del sistema también posee grandes ventajas, como por ejemplo la posibilidad de usar el nivel más alto de la jerarquía para la supervisión general del sistema y el incremento del control del proceso de fallas. En el nivel más alto de la jerarquía, un sistema de control experto basado en conocimiento fue diseñado. Fig. 4 muestra una representación esquemática del sistema desarrollado. En el sistema experto basado en conocimiento, un conjunto de 319 reglas y 45 procedimientos fueron implementados y validados en una escala piloto para ayudar a la detección de fallas, el mantenimiento de la planta y el ciclo de operación de nitrificación y desnitrificación. El conocimiento fue organizado en diversos módulos que representan el conocimiento disponible (el conocimiento existente y el adquirido por la experiencia del sistema) para cada proceso de la planta piloto de tratamiento de aguas residuales. Los módulos actúan como agentes independientes aplicando algoritmos numéricos y reglas cuando la situación es normal. El proceso de toma de decisiones es basado en razonamiento de encadenamiento hacia delante (forward chaining) cuando nuevos datos llegan a la base de datos de tiempo real. Si el sistema experto no puede tomar una decisión correcta, la intervención del operario es posible y el acceso a todos los datos del sistema lo puede realizar por medio de una interfaz gráfica.

En [2] una arquitectura denominada DAI-DEPUR fue desarrollada. Esta arquitectura es el resultado de la integración de muchas técnicas de inteligencia artificial con algunos métodos de ingeniería de control y otras técnicas de ingeniería química, tales como métodos de control numérico, modelos de ingeniería química, razonamiento basado en reglas, razonamiento basado en casos, adquisición semi-

automática de conocimiento, adquisición de datos en tiempo real y de manera asincrónica, entre otros. La supervisión realizada por el sistema es llevada a cabo de manera distribuida mediante la ejecución de diversas tareas, tales como la evaluación de sistema, diagnóstico local de subsistemas, diagnóstico global y validación y actuación del operador. La arquitectura del sistema es multinivel y provee al sistema de un cierto grado de independencia entre los diferentes niveles, entre los cuales se pueden diferenciar, el nivel de datos, el nivel de conocimiento y experiencia, el nivel situacional y el nivel de planeación. DAI-DEPUR ha sido implementado utilizando G2, una plataforma de sistemas expertos en tiempo real; LINNEO+, una herramienta semi-automática y no supervisada de adquisición de conocimiento; GAR, un generador automático de reglas de inferencia y el lenguaje de programación LISP para la implementación del razonador basado en casos.

La utilización de sistemas basados en conocimiento ha demostrado ser más poderoso en las implementaciones mencionadas, que otros sistemas usados en la actualidad, como por ejemplo técnicas de control por procesos estadísticos, métodos de controladores difusos (fuzzy controller methods) y sistemas de control de supervisión y adquisición de datos SCADA, por sus siglas en inglés (*Supervisory Control And Data Acquisition*).

IV. CONCLUSIONES

El uso de sistemas distribuidos y basados en conocimiento para el monitoreo y control de aguas residuales demuestra un gran número de ventajas pese a ser sistemas muchísimo más complejos de implementar que los sistemas utilizados en la actualidad. De esta forma se recomienda una implementación conjunta de los dos sistemas, debido a que la sinergia de una implementación conjunta ofrece mayores beneficios que implementar únicamente un sistema distribuido sin el respaldo de un sistema basado en conocimiento o viceversa. El volumen de datos que se puede obtener mediante sistemas distribuidos y de monitoreo en tiempo real es tan grande que sólo a través de la automatización en la extracción de información y la toma de decisiones, se puede revelar el verdadero beneficio del sistema.

Por otra parte, un sistema basado en conocimiento no podría tomar las decisiones adecuadas ni aprender basado en su propia experiencia, si no cuenta con la información acertada y en tiempo real, que solo puede proporcionar un sistema distribuido. Implementaciones de prototipos de sistemas distribuidos y basados en conocimiento para el control y monitoreo de plantas de tratamiento de aguas residuales fueron presentados y una nueva arquitectura de control basado en un ente regulador ha sido sugerida, con el fin de continuar ampliando el uso práctico de los proyectos de investigación interdisciplinaria que se adelantan en el IME, con el tratamiento sostenible de las aguas residuales industriales y municipales por electrocoagulación y el sensor electromagnético para el monitoreo de efluentes.

AGRADECIMIENTO

Agradecemos al Servicio de Intercambio Académico Alemán DAAD y a su homólogo por la parte Colombiana COLCIENCIAS por el soporte financiero en el proyecto PROCOL, así como al Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial MAVDT y al Instituto de Planificación y Promoción de Soluciones Energéticas IPSE, por el interés y el apoyo técnico a nuestro trabajo de investigación.

REFERENCIAS

- [1] Baeza J. A., Ferreira E. C., Lafuente J. (2000): Knowledge-based Supervision and Control of Wastewater Treatment Plant: a real time implementation. *Water Science and Technology* Vol 41 No 12 pp 129–137.
- [2] Miguel Sánchez i Marrè (1996): DAI-DEPUR : an Integrated Supervisory Multi-level Architecture for Wastewater Treatment Plants. Tesis de doctorado, Universidad Politécnica de Cataluña.
- [3] Rodríguez J, Rodríguez W, Pereira F, Hernandez C, Friedrich B (2008): Design and Implementation of an Electromagnetic Sensor for Wastewater Monitoring towards Process Optimization of Electrocoagulation Treatment. *Metall Journal*

SOBRE LOS AUTORES

MSc.-Ing. Oscar Mauricio Mendoza



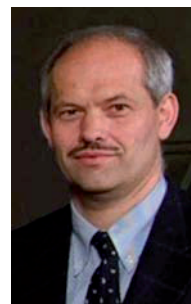
Ingeniero de Sistemas de la Universidad de los Andes, MSc. en Software Systems Engineering de la Universidad RWTH Aachen.

MSc.-Ing. Jackson Rodriguez



Ingeniero científico del Instituto de Procesos Metalúrgicos y Reciclaje de Metales IME y candidato a PhD. de la Universidad RWTH Aachen.

Prof. Dr.-Ing. Bernd Friedrich



Director del Instituto de Procesos Metalúrgicos y Reciclaje de Metales IME de la Universidad RWTH Aachen.