



HADES **Un gemelo digital** para la optimización de las EDAR

HADES **A digital twin** for WWTP optimisation

Eduard Muñoz Craviotto, Cosmin Koch Ciobotaru, M^a Mar Micó Reche
Departamento de Innovación de Agua en ACCIONA

Eduard Muñoz Craviotto, Cosmin Koch Ciobotaru, M^a Mar Micó Reche
ACCIONA Agua Innovation Department

Al proyecto HADES desarrolla un gemelo digital (GD) que funcionará como herramienta de apoyo a la decisión para la optimización del consumo energético y de reactivos de una Estación Depuradora de Aguas Residuales (EDAR), al mismo tiempo que estima la probabilidad de riesgo de fenómenos biológicos indeseables para la propia EDAR.

The HADES project is developing a digital twin (DT) that will function as a decision support tool for the optimisation of energy and chemical reagent consumption at Wastewater Treatment Plants (WWTP), whilst also estimating the risk probability of undesirable biological phenomena at the WWTP.

Palabras clave

Acciona, Control predictivo por modelos, gemelos digitales, herramientas de apoyo a la decisión, modelos heurísticos de riesgo, optimización, tratamiento de aguas residuales

Keywords

Acciona, model predictive control, digital twins, decision support tools, heuristic risk models, optimisation, wastewater treatment



LA INDUSTRIA 4.0 EN LA OPTIMIZACIÓN DE LAS EDAR

El sector del tratamiento de aguas residuales requiere un consumo significativo de energía y reactivos químicos para el funcionamiento de las diferentes EDAR. Además, tanto la eficacia como la eficiencia de sus procesos están sujetas a variaciones externas tales como condiciones meteorológicas (por ejemplo, lluvias o tormentas), y a cambios repentinos o estacionales de los caudales y carga de las aguas residuales que llegan a las EDAR. Por otra parte, ciertos eventos biológicos, difíciles de predecir y revertir, también pueden tener un impacto negativo sobre la operación. Por lo tanto, la optimización de la operación de las EDAR es fundamental para lograr sus objetivos ambientales al mismo tiempo que se reducen los costes operativos y se mantiene la estabilidad del proceso. Más aún cuando se tiene presente el contexto actual respecto a los costes de la energía, la disponibilidad y precio de los reactivos químicos empleados, y las cada vez más exigentes regulaciones de calidad de vertido para las EDAR.

Los beneficios potenciales de los avances tecnológicos ligados a la revolución Industrial 4.0 han supuesto un marco favorable para la digitalización de procesos y la implantación de soluciones tecnológicas con enfoques proactivos. Entre estas tecnologías se encuentran los Gemelos Digitales (GD), cuya popularidad se ha disparado en los últimos años. Los GD tienen una amplia gama de posibles aplicaciones y son una potente herramienta para cambiar las actuales estrategias operativas de las instalaciones de tratamiento pero también los procesos de diseño de todo tipo. Además, su capacidad para optimizar el consumo de energía y recursos, asegurar la protección ambiental (mediante procesos más eficaces y eficientes), y obtener potenciales beneficios sociales derivados de una mejor gestión los hacen especialmente relevantes [1].

¿QUÉ ES UN GEMELO DIGITAL?

Existe una falta de consenso respecto a la definición de Gemelo Digital. En su definición más amplia, un GD es una representación virtual de un entorno físico. No obstante, de acuerdo con Elena Torfs y colaboradores [2], para que una representación virtual de una planta o instalación, en cualquier lenguaje ya sea BIM, Python, etc., pueda considerarse un GD deben darse las siguientes condiciones:

- 1) Debe existir una contraparte física o entidad real

INDUSTRY 4.0 IN WWTP OPTIMISATION

WWTP operation in the wastewater treatment sector requires significant consumption of energy and chemical reagents. Moreover, both the effectiveness and the efficiency of WWTP processes are subject to external variations such as weather conditions (e.g., rainfall or storms), and sudden or seasonal changes in the flow and load of wastewater entering the WWTP. In addition, certain biological events, which are difficult to predict and reverse, can also have a negative impact on plant operation. Optimisation of WWTP operation is essential to achieve the environmental goals of these facilities, whilst reducing operating costs and maintaining process stability. Even more so, bearing in mind the current scenario regarding energy costs, the availability and price of chemical reagents, and increasingly stringent discharge quality regulations.

The potential benefits of Industry 4.0 technological advances have created a favourable framework for the digitisation of processes and the implementation of technological solutions with proactive approaches. Digital Twins are amongst these technologies and have gained great in popularity in recent years. DTs have a wide range of potential applications and are a powerful tool to change current treatment plant operational strategies, and indeed design processes of all kinds. DTs are particularly relevant due to their capacity to optimise energy and resource consumption, ensure environmental protection (through more effective and efficient processes), and provide potential social benefits through enhanced management [1].

WHAT IS A DIGITAL TWIN?

There is a lack of consensus on the definition of a Digital Twin. In its broadest definition, a DT is a virtual representation of a physical environment. However, according to Elena Torfs and collaborators [2], for a virtual representation of a plant or facility, in any language, be it BIM, Python, etc., to be considered a DT, the following conditions must be met:

- 1) There must be a physical counterpart or real entity to which the DT is connected, which can be called a Physical Twin (PT). In the case of a WWTP, the facility itself would be the PT and the WWTP SCADA would be in continuous communication with the DT.
- 2) There must be a data connection between the two twins. Whereas the data connection from the PT to the DT should be automated, the virtual-to-real connection

a la que se conecta el GD que puede denominarse Gemelo Físico, GF. En el caso de una EDAR, la propia instalación sería el GF. Su SCADA comunicaría constantemente con el GD.

2) Debe existir un flujo de información entre ambos gemelos, pero mientras que el flujo del GF al GD debe ser un flujo automatizado, el otro puede ser realizado mediante intervención humana.

3) Ambos gemelos deben evolucionar de forma sincronizada (los cambios en el GF implican una actualización del GD).

LA PERSPECTIVA PROACTIVA

Además del uso de GDs, existen otras soluciones que pueden contribuir a la optimización de la operación en las EDAR, como es el caso del Control Predictivo basado en Modelos (MPC, por sus siglas en inglés), que emplea enfoques proactivos de control avanzado y que son compatibles con los GD. Mientras que las soluciones de control clásicas como el PI/PID, que siguen siendo la práctica común en las EDAR, tienen dificultades para afrontar el comportamiento dinámico del influente, los cambios en el proceso y las perturbaciones, las soluciones basadas en MPC han demostrado que son capaces de trabajar en estas condiciones. Esto es debido a su mayor capacidad para gestionar restricciones, interacciones, cambios en el proceso y perturbaciones [3,4].

Desafortunadamente, estos enfoques todavía no están ampliamente implementados en el sector del agua. En algunos casos puede deberse a limitaciones tecnológicas o económicas (fiabilidad, disponibilidad y coste de los sensores necesarios, potencia de computaciones limitada, falta de conocimiento de los procesos, etc.). Otras razones por las que controles basados en MPC no son tan comunes como otros más clásicos

may be performed using humans.

3) The two twins must evolve together (changes in the PT imply an update of the DT).

THE PROACTIVE PERSPECTIVE

Apart from DTs, other solutions that can contribute to optimising WWTP operation include Model Predictive Control (MPC), which employs proactive advanced control approaches that are compatible with DTs. While classical control solutions such as PI/PID, still commonly implemented at WWTPs, have difficulties in coping with dynamic influent behaviour, process changes and disturbances, MPC-based solutions have proven capable of working under these conditions, due to their greater ability to manage constraints, interactions, process changes and disturbances [3,4].

Unfortunately, these solutions are not yet widely implemented in the water sector. In some cases, this may be due to technological or economic constraints (reliability, availability and cost of the necessary sensors, limited computing power, lack of process knowledge, etc.). Other reasons why MPC-based controls are not as common as more classical ones may be: the complexity of their implementation due to the need for a reliable process model; lack of the knowledge and expertise required for deployment, fine-tuning and maintenance of these controllers; a limited number of case studies demonstrating the benefits of MPC over other technologies; or simply a certain reluctance to change.

KNOWLEDGE AS A BASIS FOR MODELS

Despite remarkable developments in recent years, due to the complexity of activated sludge microbiological processes, deterministic and mechanistic models have not yet proven to be effective in predicting microbiological events that cause solids separation problems (e.g.,





podrían ser la complejidad de su implementación debido a la necesidad de un modelo fiable del proceso; el conocimiento y pericia limitados para su despliegue, puesta a punto y mantenimiento de estos controladores; un número limitado de casos de estudio demostrando los beneficios del MPC frente a otras técnicas; o, simplemente, cierta reticencia al cambio.

EL CONOCIMIENTO COMO BASE DE MODELOS

Estos procesos suelen comportarse dinámicamente a lo largo del tiempo; sus estrategias de gestión precisas implican interacciones entre diferentes aspectos, por ejemplo, cinética, catálisis, fenómenos de transporte, separaciones, etc., y requieren el uso del razonamiento y la experiencia previa para resolverse.

Sin embargo, modelos heurísticos que integran modelos numéricos y sistemas basados en conocimiento previo han mostrado resultados prometedores en la literatura. Sistema Basado en Conocimiento (KBS, siglas en inglés de Knowledge-Based Systems) y los Sistemas de Razonamiento Basados en Casos (CBRS, siglas en inglés de Case-Based Reasoning Systems) son algunos de estos ejemplos. Estos sistemas pueden ser potencialmente empleados para el apoyo a la decisión en la operación de las EDAR con el objetivo de optimizar los procesos y predecir desviaciones que permitan prevenir estos episodios [5,6].

INTEGRACIÓN DE LA FLUIDODINÁMICA Y LA BIOCINÉTICA

La familia de modelos mecanicistas de fangos activos (ASM, por sus siglas en inglés) es bien conocida dentro del sector de tratamiento de aguas residuales y su uso para la simulación de procesos biológicos de EDAR está ampliamente extendido. Desde la introducción del ASM1 en 1987 se han sido desarrolladas varias versiones, habiendo sido todas ellas validadas por la comunidad científica sectorial. Hoy en día están considerados un estándar en la simulación de EDARs.

Al mismo tiempo, el uso de modelos de Computación de Dinámica de Fluidos (CFD, por sus siglas en inglés) cada vez más complejos y detallados de unidades de proceso de tratamiento de aguas residuales se ha vuelto popular debido a los avances en la modelización de procesos multifásicos[7], ya que estas simulaciones pueden proporcionar predicciones útiles sobre la dinámica de fluidos y los fenómenos de transferencias de especies clave. Si bien el acoplado de los modelos multifásicos CFD y los ASM (CFD+ASM)

biological foams, filamentous bulking and sludge deflocculation) or Greenhouse Gas (GHG) emissions such as N_2O .

These processes often behave dynamically over time and precise management strategies involve interactions between different aspects (e.g., kinetics, catalysis, transport phenomena, separation, etc.), and the use of reasoning and prior experience are required to find solutions.

However, heuristic models that integrate numerical models and systems based on prior knowledge have shown promising results in the literature. Knowledge-Based Systems (KBS) and Case-Based Reasoning Systems (CBRS) are examples of this. These systems can potentially be used for decision support in WWTP operation to optimise processes and predict deviations in order to facilitate prevention [5,6].

INTEGRATION OF FLUID DYNAMICS AND BIOKINETICS

The family of activated sludge mechanistic models (ASM) is well known within the wastewater treatment sector. These models are widely used to simulate biological WWTP processes. Since the introduction of ASM1 in 1987, several versions have been developed and all of them have been validated by the scientific community. They are now considered a standard in WWTP simulation.

At the same time, the use of increasingly complex and detailed Computational Fluid Dynamics (CFD) models of wastewater treatment process units has become popular due to advances in multiphase process modelling [7], as these simulations can provide useful predictions on fluid dynamics and key species transfer phenomena. Although the coupling of multiphase CFD and ASM (CFD+ASM) models is in its infancy [8], it shows interesting potential for the study of chemical and biological phenomena in these processes.

The resolution of CFD+ASM models is highly demanding in computational terms, which is an obstacle to the feasibility of their integration within a DT. However, hybrid modelling approaches that combine CFD+ASM models with other methods or techniques could significantly reduce computational times, while the simulation results obtained are still sufficiently precise to be considered realistic and meaningful.

THE HADES PROJECT

The HADES project, in which ACCIONA is participating along with the LEQUIA Chemical and Environmental En-

se encuentra en sus primeros pasos [8], muestra un potencial interesante para el estudio de fenómenos químicos y biológicos en estos procesos.

La resolución de modelos CFD+ASM es altamente exigente en términos computacionales, por lo que su integración dentro de un GD es difícilmente viable. Sin embargo, enfoques basados en modelos híbridos que combinan los modelos CFD+ASM con otros métodos o técnicas podrían reducir significativamente los tiempos de computación al tiempo que los resultados de simulación obtenidos mantienen una precisión suficiente para poder considerarlos realistas y significativos.

EL PROYECTO HADES

El proyecto HADES, en el que ACCIONA participa junto a Laboratori d'Enginyeria Química i Ambiental, LEQUIA, de la Universitat de Girona, persigue el desarrollo un GD, que integre las iniciativas mencionadas para el apoyo a la decisión, con el objetivo de mejorar la eficiencia, fiabilidad y cumplimiento de la calidad requerida a la EDAR.

La Figura 1 representa de forma simplificada los principales elementos del GD HADES.

El núcleo de la herramienta lo compondrán modelos matemáticos ASM y modelos hidrodinámicos tipo CFD (dinámica de fluidos computacional) que se extenderán con la integración de los modelos biológicos ASM. El Centro de datos de HADES se encargará de adquirir datos regularmente de diversas fuentes de datos: SCADA (Supervisión, Control y Adquisición de Datos, por sus siglas en inglés) de la EDAR, informes, bases de datos meteorológicas en tiempo real, etc., que serán validados para detectar posibles valores anómalos o ausentes, y reconstruidos si fuera necesario [8]. El Centro de Control y Monitorización tendrá dos funciones: Por un lado, computar estrategias optimizadas de control basadas en MPC y otros algoritmos de control, y validar estas estrategias sobre los modelos matemá-

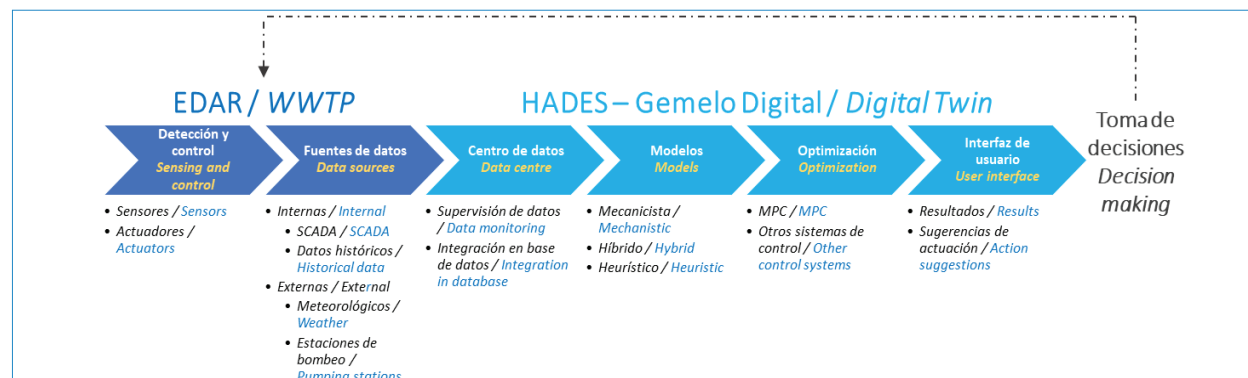
gineering Laboratory of the University of Girona, aims to develop a DT that integrates the above-mentioned initiatives for decision support with the objective of improving the efficiency, reliability and quality compliance required of WWTPs. Figure 1 shows the main elements of the HADES DT in simplified form.

The core of the tool will consist of ASM mathematical models and CFD hydrodynamic models, which will be extended with the integration of biological ASMs. The HADES Data Centre will regularly acquire data from a number of data sources: WWTP SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition) systems, reports, real-time meteorological databases, etc., which will be validated for potentially anomalous or missing values and reconstructed if necessary [8]. The Control and Monitoring Centre will have two functions: Firstly, to compute optimised control strategies based on MPC and other control algorithms, and to validate these strategies with the mathematical models. And secondly, to display through a User Interface (UI) the relevant results and conclusions obtained, and suggested actions to optimise the operation of the plant, in order to improve its efficiency and prevent potential performance problems. Other forms of the models will be made available to the user through the UI for the simulation of "what-if" scenarios and for educational or operator training purposes.

Through the implementation of HADES, ACCIONA expects to achieve a 50% reduction in episodes of non-compliance with discharge quality, a 15% reduction in energy consumption based on advanced control (approximately euros 0.02/m³ of treated water), and savings of euros 92,000/d in reagents needed for chemical removal of phosphorus and the improvement of sludge sedimentation and dehydratability.

HADES will initially be deployed, monitored and validated at the ACCIONA-operated La Almunia WWTP and will form part of the Special Sanitation and Was-

Figura 1. Esquema de los principales elementos de HADES / Figure 1. Schematic diagram of the main elements of HADES





ticos. Por otro lado, mostrar a través de una Interfaz de Usuario (IU) los resultados y conclusiones relevantes obtenidas, y las sugerencias de acciones para optimizar la operación de la planta, de manera que se mejore su eficiencia y eviten posibles problemas de rendimiento. Otras instancias de los modelos quedarán a disposición del usuario a través de la IU para la simulación de escenarios “y-si” y con finalidades formativas o de entrenamiento de operadores.

Con la implementación de HADES, ACCIONA espera reducir un 50% de los episodios de incumplimiento en la calidad de vertido, la reducción del 15% del consumo energético a partir del control avanzado (aproximadamente 0,02 euros /m³ de agua tratada), y el ahorro de 92.000 euros/d en reactivos necesarios para la eliminación química de fósforo y la mejora de la sedimentabilidad y deshidratabilidad de fangos.

En una primera instancia HADES será desplegado, monitorizado y validado en la EDAR de La Almunia, operada por ACCIONA y enmarcada en el Plan Especial de Saneamiento y Depuración de Aragón promovido por el Instituto Aragonés del Agua. Esta EDAR da servicio a los municipios de La Almunia de Doña Godina, Almonacid de la Sierra, Alpartir, Calatorao y Ricla. La planta tiene una capacidad de 10.500 m³/d y una carga aproximada de 28.350 h.e., y ya cuenta con un buen nivel de instrumentación y automatización, aunque se instalarán nuevos equipos para la monitorización de parámetros clave para el GD. La EDAR La Almunia ha albergado anteriormente proyectos de digitalización, lo que la convierte en un entorno favorable para el despliegue de HADES. El GD funcionará como una herramienta de apoyo a la operación de la EDAR, dejando a criterio del operador el cierre el lazo de control empleando las estrategias de operación optimizadas sugeridas.

Este proyecto está financiado por MCIN/AEI/10.13039/501100011033 y por la UE NextGenerationEU/PRTR (Código CPP2021-009097). Cuenta con el apoyo del Plan de Doctorados Industriales de la Secretaría de Universidades e Investigación del Departamento de Empresa y Conocimiento de la Generalitat de Cataluña.

te wastewater Treatment Plan of the Region of Aragon, promoted by the Aragonese Water Institute. This WWTP serves the municipalities of La Almunia de Doña Godina, Almonacid de la Sierra, Alpartir, Calatorao and Ricla. The plant has a capacity of 10,500 m³/d and an approximate unit per capita loading (PE) of 28,350. The plant is already well equipped in terms of instrumentation and automation, although new equipment will be installed to monitor key parameters for the DT. La Almunia WWTP has previously hosted digitisation projects, making it a favourable environment for the deployment of HADES. The DT will function as a tool to support WWTP operation, while the implementation of the optimised operating strategies suggested in order to close the control loop will be left to the operator's discretion.

This project is funded by the MCIN/AEI/10.13039/501100011033 and by the European Union NextGenerationEU/PRTR fund (Code CPP2021-009097). The HADES project has the support of the Industrial Doctorates Plan of the Secretariat for Universities and Research of the Department of Enterprise and Knowledge of the Government of Catalonia.

Referencias / References

- [1] W. Audenaert, Digital Twins in the water industry: it just started, and the potential is huge, Smart Water Mag. 14 (2022).
- [2] E. Torfs, N. Nicolai, S. Daneshgar, J.B. Copp, H. Haimi, D. Ikumi, B. Johnson, B.B. Plosz, S. Snowling, L.R. Townley, B. Valverde-Pérez, P.A. Vanrolleghem, L. Vezzaro, I. Nopens, The transition of WRRF models to digital twin applications, Water Sci. Technol. 85 (2022) 2840–2853. <https://doi.org/10.2166/wst.2022.107>.
- [3] A. Zhang, J. Liu, Economic MPC of Wastewater Treatment Plants Based on Model Reduction, Processes. 7 (2019). <https://doi.org/10.3390/pr7100682>.
- [4] S. Revollar, P. Vega, R. Vilanova, Economic optimization of Wastewater Treatment Plants using Non Linear Model Predictive Control, in: 2015 19th Int. Conf. Syst. Theory, Control Comput., 2015: pp. 583–588. <https://doi.org/10.1109/ICSTCC.2015.7321356>.
- [5] J. Comas, I. Rodríguez-Roda, M. Sánchez-Marrè, U. Cortés, A. Freixó, J. Arráez, M. Poch, A knowledge-based approach to the deflocculation problem: integrating on-line, off-line, and heuristic information, Water Res. 37 (2003) 2377–2387. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0043-1354\(03\)00018-6](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0043-1354(03)00018-6).
- [6] I.R. Rodríguez-Roda, M. Sánchez-Marrè, J. Comas, J. Baeza, J. Colprim, J. Lafuente, U. Cortés, M. Poch, A hybrid supervisory system to support WWTP operation: implementation and validation, Water Sci. Technol. 45 (2002) 289–297. <https://doi.org/10.2166/wst.2002.0608>.
- [7] A.M. Karpinska, J. Bridgeman, CFD-aided modelling of activated sludge systems – A critical review, Water Res. 88 (2016) 861–879. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.watres.2015.11.008>.
- [8] J. Climent Agustina, Development of a modelling tool to perform hydrodynamics coupled with biological processes in the secondary stage



Financiado por
la Unión Europea
NextGenerationEU



Plan de
Recuperación,
Transformación
y Resiliencia



DOCTORATS
INDUSTRIALS
Alianza de talent!



Agència
de Gestió
d'Ajuts
Universitaris
i de Recerca