

Jornadas de Automática

Influencia de la temperatura y las acciones de control en las reacciones biológicas del proceso de fangos activados

Sánchez, L.^a, Revollar, S.^{b,*}, Francisco, M.^b, Vega, P.^a, Meneses, M.^c, Vilanova, R.^c

^a Dpto. de Informática y Automática, ETSII de Béjar, 37700 Béjar (Salamanca)

^b Dpto. de Informática y Automática, Facultad de Ciencias, 37008 Salamanca.

^c Dpto. de Telecomunicaciones e Ingeniería de Sistemas, Escuela de Ingeniería, Universitat Autònoma de Barcelona, 08193 Barcelona

To cite this article: Sánchez, L., Revollar, S., Francisco, M., Vega, P., Meneses, M., Vilanova, R. 2024. Influence of temperature and control actions on biological reactions in activated sludge process. *Jornadas de Automática*, 45. <https://doi.org/10.17979/ja-cea.2024.45.10960>

Resumen

Este artículo presenta un análisis exhaustivo de la influencia de la temperatura sobre la dinámica de los procesos de eliminación de compuestos nitrogenados (nitrificación y desnitrificación) en el proceso de fangos activados (lodos activados) de una Estación Depuradora de Aguas Residuales (EDAR). El objetivo es determinar el efecto de la temperatura sobre las reacciones biológicas y variables de proceso involucradas, para establecer posibles acciones de control que mejoren la eficacia del tratamiento a bajas temperaturas. El Benchmark Simulation Model 2 (BSM2) se usa como planta de referencia, ya que representa la operación de una EDAR sometida a variaciones diarias y estacionales del influente en un año de operación. En este trabajo se consideran tres escenarios distintos de temperatura entre 8°C y 14°C. Se ha seleccionado un periodo de evaluación de 4 días con condiciones estándar de caudal y carga para estudiar la evolución de las variables relacionadas con la aireación y la eliminación de compuestos nitrogenados, así como la cinética de los procesos biológicos, tomando en cuenta la operación de la EDAR en modo manual (lazo abierto) y con la estrategia de control de oxígeno disuelto propuesta en el BSM2.

Palabras clave: Control óptimo y operación de sistemas de recursos acuáticos, Monitorización y evaluación de desempeño, Aplicaciones de control de procesos, Control de procesos no lineales, Dinámica y control.

Abstract

This article presents an exhaustive analysis of the influence of temperature on the dynamics of the processes of elimination of nitrogenous compounds (nitrification and denitrification) in the activated sludge process in a Wastewater Treatment Plant (WWTP). The objective is to address the effect of temperature on these biological reactions and the associated process variables, to determine possible control actions that improve the effectiveness of treatment at low temperatures. The Benchmark Simulation Model 2 (BSM2), which allows evaluating a year of operation with daily and seasonal variations of the influent has been selected as reference model. In this work, three temperature scenarios between 8°C and 14°C are considered, and an evaluation period of 4 days with standard flow and load conditions has been selected. In that period, the evolution of the variables related to aeration and the elimination of nitrogenous compounds has been studied, as well as the kinetics of biological processes operating in manual mode (open loop) and with the dissolved oxygen control strategy proposed in the BSM2.

Keywords: Optimal control and operation of water resources systems, Monitoring and performance assessment, Process control applications, Nonlinear Process Control, Dynamics and control.

1. Introducción

Las estaciones depuradoras de aguas residuales (EDAR) han sido objeto de estudio en el área de optimización y control de procesos por distintos motivos (Gernaey et al., 2010; Vilanova et al., 2017a; Vilanova et al., 2017b). Entre estos destacan, la complejidad y no linealidad de los procesos biológicos que tienen lugar en las distintas unidades de las EDAR, y la variabilidad del influente. El influente

experimenta variaciones diarias y estacionales en el caudal y la carga de contaminantes que se traducen en continuas perturbaciones sobre el proceso. Estas se deben a las actividades de la población, las precipitaciones, la gestión de alcantarillado y los vertidos industriales (Gernaey et al., 2021). Por lo tanto, el sistema de control debe actuar para garantizar la calidad del efluente deseada con el mínimo consumo de recursos (energía y aditivos químicos), considerando las características del influente y la no linealidad de los procesos (Revollar et al., 2021). En la

actualidad, las EDAR son un elemento importante del flujo de materiales en una Economía Circular por tratarse de plantas de recuperación de recursos. Esto hace que su operación y control sean un problema aún más interesante.

El proceso de lodos activados es el tratamiento biológico comúnmente utilizado en las EDARs municipales para eliminar materia orgánica y nutrientes (fósforo y nitrógeno). En el caso de los compuestos nitrogenados, su eliminación tiene lugar mediante los procesos de nitrificación y desnitrificación. En la nitrificación, el crecimiento de microorganismos autótrofos en condiciones aerobias produce la transformación de amonio (NH_4^+ y NH_3) a nitratos. En la desnitrificación, los nitratos (NO_3) son reducidos a nitrógeno gaseoso (N_2) en condiciones anóxicas debido a la actividad de microorganismos heterótrofos (Pons et al., 2021).

La temperatura del agua residual es un parámetro crucial que afecta la cinética de los procesos biológicos, la transferencia de oxígeno y las necesidades de calefacción en las EDAR (Vanrolleghem et al., 2021). Esta depende de la ubicación geográfica y se ve afectada por vertidos de agua caliente y las estaciones. La actividad de las bacterias responsables de la nitrificación y desnitrificación está fuertemente influenciada por la temperatura (Jeppsson et al., 2007; Vanrolleghem et al., 2021). A bajas temperaturas, la actividad bacteriana disminuye, ralentizando las reacciones bioquímicas para la conversión de amonio a nitrato (NO_3), y de NO_3 a N_2 , mientras que, a altas temperaturas, estas reacciones se aceleran, mejorando la eficiencia del tratamiento dentro de ciertos límites.

Estudios previos (Revollar et al., 2021; Revollar et al., 2023) han analizado cómo las variaciones estacionales del influente afectan la eco-eficiencia de las EDAR usando el BSM2-Benchmark Simulation Model 2 (Alex et al., 2018; Pons et al., 2021). En el BSM2, la estrategia de control se centra en regular el oxígeno disuelto (S_O o DO) en los reactores aerobios, manteniendo un rango de temperatura anual de 10°C a 20°C . En Revollar et al. (2023), se observó que el sistema de control garantiza un adecuado seguimiento de la referencia de S_O en todo el rango de temperatura. No obstante, aunque se cumplen los objetivos de control, las condiciones deseadas del efluente se alcanzan fácilmente a altas temperaturas y con dificultad a bajas temperaturas, llegando a producir violaciones de los límites impuestos.

En este trabajo se estudia el efecto de la temperatura sobre la dinámica de los procesos de nitrificación y desnitrificación que tienen lugar en el proceso de lodos activos de la EDAR. El objetivo principal es evaluar el efecto de la temperatura sobre la eliminación de amonio, la producción de nitratos y la desnitrificación, considerando además los posibles efectos del oxígeno disuelto y la transferencia de oxígeno, para establecer posibles acciones de control que mejoren la eficacia del tratamiento a bajas temperaturas. Para esto se ha seleccionado un periodo de evaluación con condiciones estándar de caudal y carga, y se ha estudiado la evolución de las variables relacionadas con la aireación y la eliminación de compuestos nitrogenados, así como la cinética de los procesos biológicos. Se comparan el comportamiento de la EDAR en lazo abierto con el BSM2 en modo manual, y lazo cerrado con la estrategia de control predeterminada del BSM2.

2. Metodología

2.1. Descripción del sistema

En este trabajo se utiliza el BSM2, que representa la línea de agua y la línea de fangos de una EDAR municipal, como planta de referencia (Alex et al., 2018). El modelo del influente (Jeppsson et al., 2007; Gernaey et al., 2021) representa un año de operación con periodos secos y lluviosos, cambios de temperatura típicos de un país del Norte de Europa, y variaciones debido a las actividades de la población. El periodo de muestreo es de 15 minutos.

El proceso de depuración biológica en la línea de aguas del BSM2 está representado por el Benchmark Simulation Model 1 (BSM1). El BSM1 simula el proceso de lodos activados para eliminación de materia orgánica y nutrientes en una EDAR estándar, incluyendo controladores clásicos para regular el oxígeno disuelto en los reactores biológicos (Jeppsson et al., 2007; Pons et al., 2021). Esta planta consta de cinco reactores biológicos en serie y un sedimentador secundario (Figura 1). Los dos primeros reactores (R1, R2) son anóxicos y el resto (R3, R4, R5) son aerobios. El caudal de recirculación interno (Q_a) devuelve el licor mezcla de R5 a R1. El decantador secundario separa el efluente limpio (Q_e) de los fangos. El fondo del decantador (Q_u) se divide en el caudal de recirculación externo (Q_r) que devuelve los fangos a R1 y el caudal de purga (Q_w) que se retira del sistema.

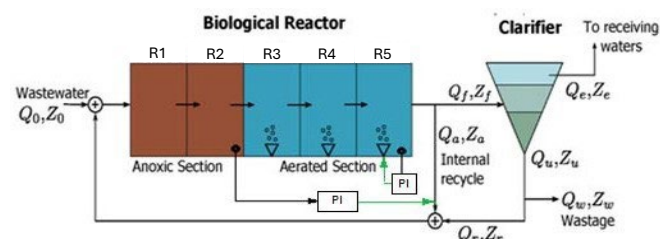


Figura 1: Estructura de la planta para el Benchmark BSM1

El ASM1 (Activated Sludge Model N° 1, Henze et al., 2006) es el modelo matemático que describe los procesos biológicos en el BSM1, integrado en el BSM2, considerando 13 variables de estado por cada reactor (Tabla 1). Los procesos biológicos relevantes en este trabajo son:

- Crecimiento aeróbico de heterótrofos. Convierte el sustrato fácilmente biodegradable, el oxígeno disuelto y el amonio en biomasa heterótrofa.

$$\rho_1 = \mu_H \cdot \left(\frac{S_S}{K_S + S_S} \right) \cdot \left(\frac{S_O}{K_{O,H} + S_O} \right) X_{B,H} \quad (1)$$

- Crecimiento anóxico de heterótrofos (Desnitrificación). Convierte el sustrato fácilmente biodegradable, y los nitratos en nitrógeno gaseoso.

$$\rho_2 = \mu_H \cdot \left(\frac{S_S}{K_S + S_S} \right) \cdot \left(\frac{K_{O,H}}{K_{O,H} + S_O} \right) \left(\frac{S_{NO}}{K_{NO} + S_{NO}} \right) \eta_g X_{B,H} \quad (2)$$

- Crecimiento aeróbico de autótrofos (Nitrificación). Convierte el oxígeno disuelto y el amonio en biomasa autótrofa y nitratos.

$$\rho_3 = \mu_A \cdot \left(\frac{S_{NH}}{K_{NH} + S_{NH}} \right) \cdot \left(\frac{S_O}{K_{O,A} + S_O} \right) X_{B,A} \quad (3)$$

Los otros procesos considerados en el ASM1 son: el decaimiento de heterótrofos (ρ_4), el decaimiento de autótrofos (ρ_5), la amonificación del nitrógeno orgánico soluble (ρ_6), la hidrólisis de materia orgánica compuesta (ρ_7), la hidrólisis del nitrógeno orgánico compuesto (ρ_8).

Los parámetros μ_H y μ_A son tasas de crecimiento específicas para microorganismos heterótrofos y autótrofos, respectivamente, definidos en el modelo ASM1. μ_H y μ_A crecen exponencialmente con la temperatura, al igual que otros parámetros cinéticos de los 8 procesos biológicos considerados en el BSM2 (Alex et al., 2018).

Tabla 1: Variables del modelo ASM1 utilizado en la planta de referencia BSM2

Descripción	Nombre
Materia orgánica inerte soluble (g DQO/m ³)	S _I
Sustrato fácilmente biodegradable (g DQO/m ³)	S _S
Materia orgánica inerte insoluble (g DQO/m ³)	X _I
Sustrato de degradación lenta (g DQO/m ³)	X _S
Biomasa heterótrofa activa (g DQO/m ³)	X _{B,H}
Biomasa autótrofa activa (g DQO/m ³)	X _{B,A}
Productos insolubles que provienen de decaimiento de biomasa (g DQO/m ³)	X _P
Oxígeno disuelto (g/m ³)	S _O
Nitratos y nitritos (g N/m ³)	S _{NO}
Nitrógeno en forma de NH ₄ ⁺ + NH ₃ (g N/m ³)	S _{NH}
Nitrógeno orgánico soluble biodegradable (g N/m ³)	S _{ND}
Nitrógeno orgánico insoluble biodegradable (g DQO/m ³)	X _{ND}
Alcalinidad (mol/m ³)	S _{alk}

A partir de estos procesos biológicos, se construyen las reacciones globales que determinan la aparición y desaparición de los principales constituyentes en el proceso de lodos (o fangos) activados (Tabla 1). Se presentan las ecuaciones para los nitratos y amonios (Alex et al., 2018).

- Velocidad de formación de Nitratos:

$$r_{NO} = -\frac{1-Y_H}{2.86 \cdot Y_H} \rho_2 + \frac{1}{Y_A} \rho_3 \quad (4)$$

- Velocidad de formación de Amonios:

$$r_{NH} = -i_{XB} \cdot \rho_1 - i_{XB} \cdot \rho_2 - \left(i_{XB} + \frac{1}{Y_A} \right) \rho_3 + \rho_6 \quad (5)$$

2.2. Estrategia de control

La estrategia de control predeterminada para la planta BSM2 es el control de oxígeno disuelto (DO) en el cuarto reactor (R4) del proceso de lodos activados, y el control basado en temporizador del caudal de purga (Q_w). El DO en R4 se regula a una referencia de 2 g_{COD}/m³ utilizando un controlador PI. La variable manipulada es el coeficiente de transferencia de oxígeno del cuarto reactor (K_{La4}). Los

movimientos de control de K_{La4} afectan el perfil de DO en toda la zona aeróbica, ya que los coeficientes de transferencia de oxígeno para R3 y R5 (K_{La3} y K_{La5}) se calculan a partir de K_{La4} con ganancias proporcionales de 1 y 0.5, respectivamente. La edad del lodo (SA) se ajusta utilizando el caudal de purga (Q_w) a 300 m³/d en el período más frío y a 450 m³/d en el período más cálido. La SA se reduce en el período más cálido debido al efecto favorable de la temperatura sobre las reacciones biológicas.

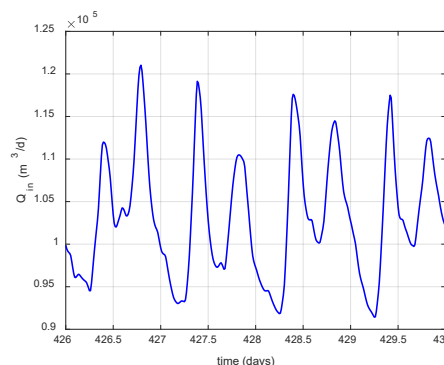


Figura 2: Caudal en los reactores del Proceso de Fangos Activados

2.3. Metodología

Para llevar a cabo el estudio se realizan simulaciones del comportamiento de la planta con el influente dinámico del BSM2. Se ha elegido un periodo de observación de 4 días, del día 426 al 430 del perfil de influente, donde se presentan condiciones estándar de caudal y carga. El perfil de caudal del influente (Q_{in}) se presenta en la Figura 2. Se consideran 3 escenarios de temperatura del influente T_{in} : 8°C, 10°C y 14°C.

Para entender mejor el efecto de la temperatura sobre la respuesta dinámica de la planta, se observa el comportamiento en lazo abierto y el comportamiento con la estrategia de control predeterminada del BSM2. A lazo abierto se aprecian los efectos directos de la temperatura sobre los procesos biológicos sin interferencias derivadas del control de oxígeno. En cambio, la respuesta del sistema con el sistema de control de DO en R4, permite apreciar la interacción entre el efecto de la temperatura y la concentración de oxígeno disuelto. Esta comparación permite discernir qué efectos sobre los procesos biológicos son inherentes a los cambios de temperatura y cuáles dependen, además, de las acciones de control. En ambos casos, lazo abierto y control de oxígeno, se comparan S_{NOIN} y S_{NHIN} después del punto de mezcla de las recirculaciones, para observar el efecto de la carga de la recirculación, y las variables de control. Se presentan las reacciones biológicas, de S_{NH} y S_{NO} y sus concentraciones en R2 y R5.

3. Efecto de la temperatura sobre el desempeño de la EDAR en modo manual con $K_{La4}=120$ 1/d

En primer lugar, se presenta el estudio en lazo abierto para observar los efectos de la temperatura sobre las reacciones de nitrificación y desnitrificación, sin la interferencia de las acciones para el control de DO. En las Figuras 3 y 4 se muestra la concentración de nitratos y amonio

a la entrada del sistema de reactores, cuando ya se han mezclado el influente y las recirculaciones Q_r y Q_a . Se puede observar que la concentración de nitratos (S_{NOin}) es mucho mayor a menor temperatura, indicando que hay exceso de nitratos a la salida de R5, y que la recirculación Q_a aumenta la carga de NO_3 a la entrada del sistema de fangos activados (S_{NOin}), lo que requiere mayor esfuerzo para llevar a cabo la desnitrificación en condiciones anóxicas. Un efecto similar se observa con los amonios (S_{NHin}), pero no es tan notoria la diferencia entre las distintas temperaturas (Figura 4).

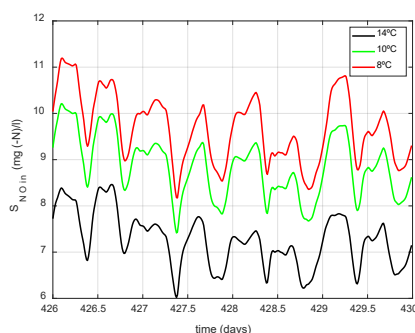


Figura 3: Nitratos (S_{NOin}) a la entrada del Proceso de Fangos Activados en modo manual con $K_{La4}=120$ 1/d

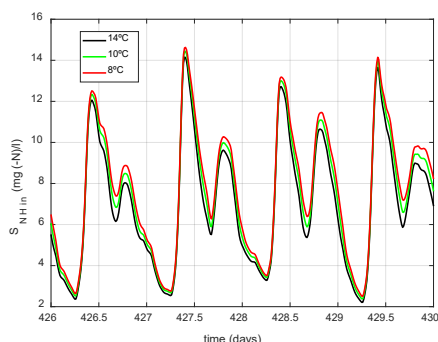


Figura 4: Amonios (S_{NHin}) a la entrada del Proceso de Fangos Activados en modo manual con $K_{La4}=120$ 1/d

La Figura 5 muestra la influencia de la temperatura sobre el oxígeno disuelto en R4 (S_{O4}) con un K_{La4} constante de 120 1/h. Se observa que el DO es mayor a temperaturas más bajas debido a la disminución de la actividad microbiana y la mayor solubilidad del oxígeno. A temperaturas más altas, la actividad microbiana y la demanda de oxígeno aumentan, reduciendo los niveles de S_{O4} .

La Figura 6, se muestran las concentraciones de amonios y nitratos (S_{NH} , S_{NO}) en R2 y R4, y las velocidades de aparición y desaparición de estos compuestos en la parte inferior de la figura. En todos los casos, las concentraciones más altas (S_{NH} , S_{NO}) corresponden a la temperatura inferior de 8°C, seguida por la temperatura de 10°C, y la más baja es la de 14°C. En cuanto a las velocidades de reacción, en R2 se observa que la velocidad de formación de amonios r_{NH} aumenta ligeramente con la temperatura. Los nitratos se convierten en N_2 como parte de la desnitrificación, por lo que r_{NO} es negativa. Las bajas temperaturas deterioran este proceso, y esto se refleja en los niveles de S_{NO} en R2, que están por debajo de $5g/m^3$ a 14°C y aumentan $4 g/m^3$, aproximadamente, a 8°C.

En el reactor R5, r_{NH} es negativa porque los amonios se convierten en nitratos, y por lo tanto, r_{NO} es positiva. Las bajas temperaturas provocan una mayor r_{NO} y un aumento en los niveles de S_{NO} . Este incremento en la concentración de nitratos (S_{NO}) en R5 tiene que ver, además, con el deterioro de la desnitrificación en R2. A bajas temperaturas no se ha eliminado suficiente nitrato en la zona anóxica, y llega una mayor cantidad de nitratos a la zona aerobia, a la cual se suman los que se producen en la nitrificación. Este exceso se propaga por las recirculaciones (Q_a y Q_r) afectando todo el proceso de eliminación de compuestos nitrogenados.

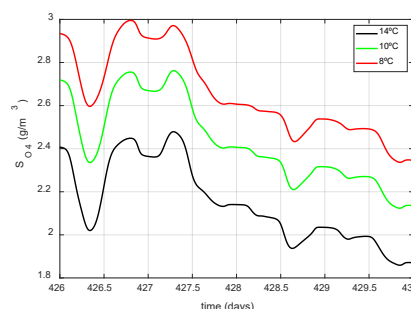


Figura 5: Oxígeno disuelto (S_{O4}) en R4 del Proceso de Fangos Activados en modo manual con $K_{La4}=120$ 1/d

4. Efecto de la temperatura sobre el desempeño de la EDAR con el sistema de control de oxígeno disuelto

En el sistema a lazo cerrado, la situación se complica, al mantener una concentración de oxígeno fija en los reactores aerobios hay mayor interacción entre procesos y variables de operación. En la Figura 7 se muestran S_{NO} y S_{NH} en R2 y R5, así como las velocidades de reacción r_{NH} y r_{NO} .

En el reactor R2, la dinámica de r_{NH} y S_{NH} , es muy similar a la observada cuando se opera en modo manual. En este reactor, la desnitrificación es el aspecto más relevante. Al igual que en la operación en modo manual, la velocidad de desaparición de nitratos r_{NO} aumenta y los niveles de S_{NO} son menores a temperaturas más altas. Sin embargo, al operar con control de oxígeno disuelto, este efecto se acentúa para r_{NO} , y se atenúa en S_{NO} (Figura 7) y se observa un cambio notorio en la forma de los perfiles, que dejan de ser simétricos. Los niveles de S_{NO} a 14°C alcanzan los $6 g/m^3$. En unas zonas la diferencia con el perfil de 8°C es de $2g/m^3$ y en otras la diferencia es de $0.5 g/m^3$.

En el reactor R5, con una concentración de oxígeno constante garantizada por el sistema de control, la oxidación del amonio por parte de los microorganismos es favorecida por temperaturas más altas, los niveles de S_{NH} son mucho menores a temperaturas más altas. En la Figura 7 no se puede distinguir un efecto claro de la temperatura para S_{NO} , r_{NH} y r_{NO} en R5, las líneas de los distintos escenarios se entrecruzan, evidenciando una clara interacción entre las variables involucradas (temperatura, concentración de amonios y nitratos y concentración de oxígeno disuelto). Esto indica la necesidad de considerar múltiples factores al evaluar el desempeño del sistema de control y tomar decisiones de operación en estos sistemas.

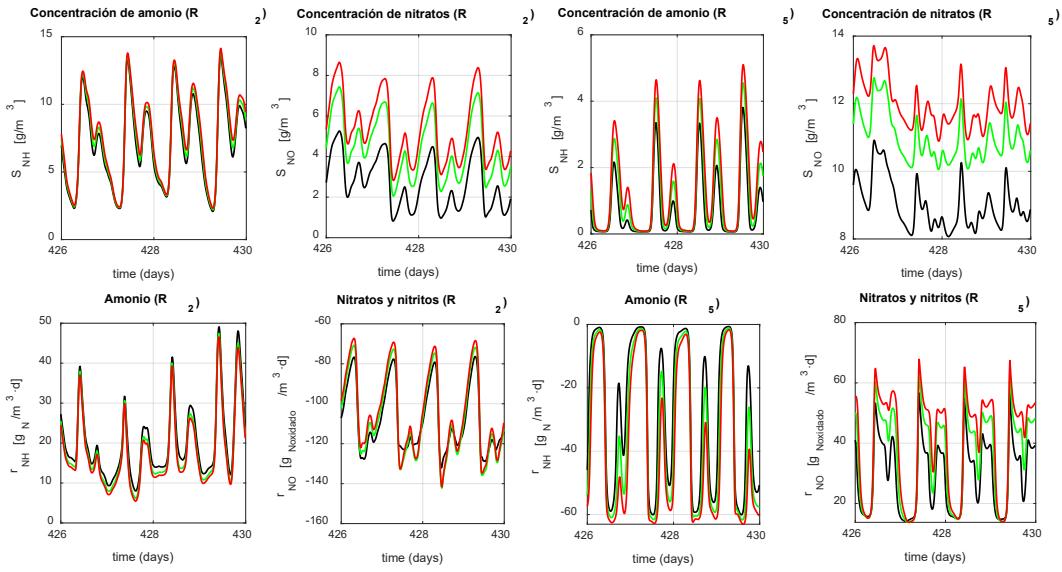


Figura 6: S_{NH} , S_{NO} , r_{NH} y r_{NO} en el reactor anóxico (R2) y en el reactor aerobio (R5) en lazo abierto con K_{LA4} : 120 1/d (Negro: 14°C, Verde: 10°C, Rojo: 8°C)

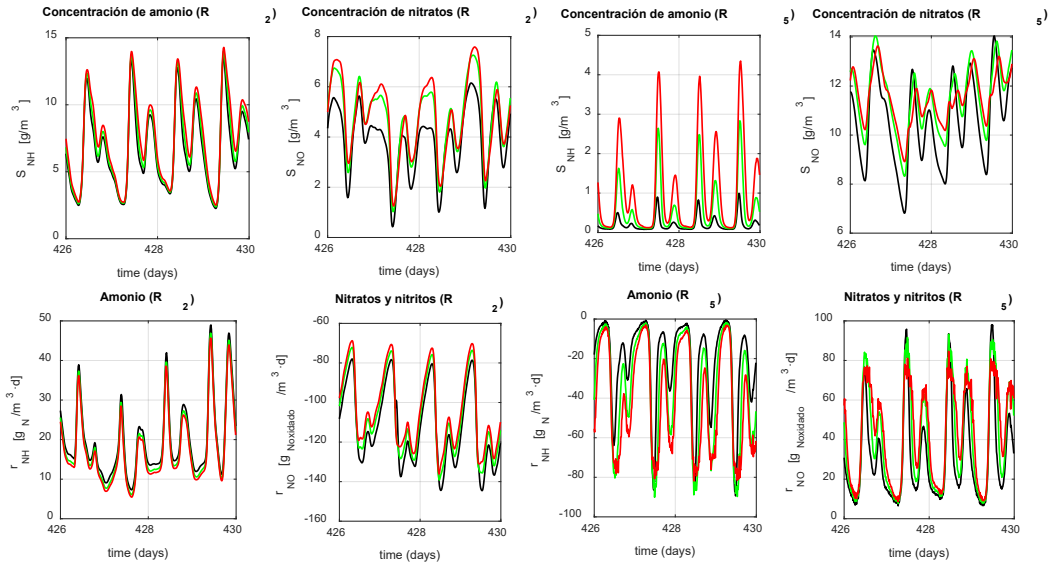


Figura 7: S_{NH} , S_{NO} , r_{NH} y r_{NO} para el reactor anóxico (R2) y para el reactor aerobio (R5) con control de DO en el reactor 4 en lazo cerrado (Negro: 14°C, Verde: 10°C, Rojo: 8°C)

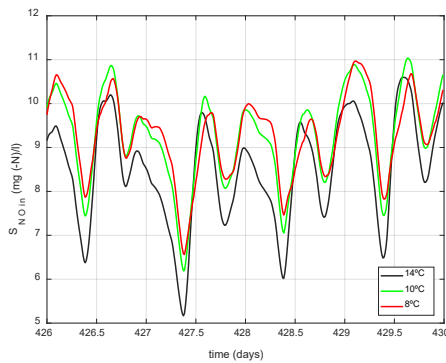


Figura 8: Nitratos (S_{NOin}) a la entrada del Proceso de Fangos Activados en control DO en $2 g_{COD}/m^3$

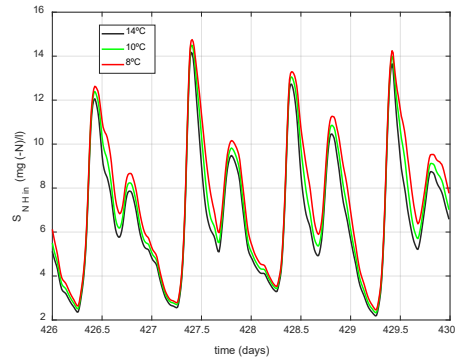


Figura 9: Amonios (S_{NHin}) a la entrada del Proceso de Fangos Activados en control DO en $2 g_{COD}/m^3$

Una eliminación ineficiente de los compuestos nitrogenados produce una mayor carga en la alimentación, debido a la recirculación (Figuras 8 y 9), lo que afecta la velocidad de las reacciones y la eficiencia del proceso.

El control del oxígeno (Figuras 10 y 11) es el paso que inicia la cadena de procesos en los cuales los microorganismos oxidan el nitrógeno celular en forma de amonio. En la Figura 10 se observa que la referencia de oxígeno se alcanza adecuadamente para todas las temperaturas en R4, aunque en R5, donde no se supervisa esta variable, decae la concentración a bajas temperaturas. También se observa, en la Figura 11, que se requiere menor energía (K_{La4}) para alcanzar el mismo S_{O_4} , a bajas temperaturas.

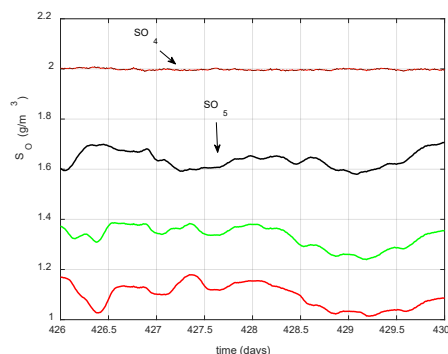


Figura 10: Oxígeno disuelto (S_{O_4} , S_{O_5}) en R4 y R5 del Proceso de Fangos Activados con control DO en 2 gCOD/m^3

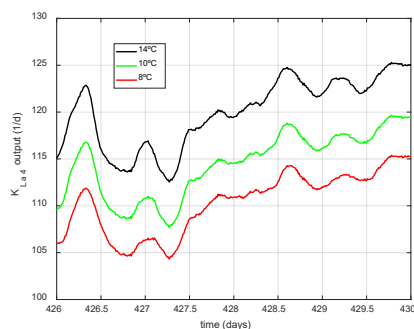


Figura 11: Coeficiente de transferencia de oxígeno (K_{La4}) en R4 del Proceso de Fangos Activados con control DO en 2 gCOD/m^3

5. Conclusiones

La temperatura es un factor determinante en los procesos biológicos de las plantas de tratamiento de aguas residuales, influyendo directamente en la actividad microbiana y, por ende, en la eficiencia de procesos como la nitrificación y la desnitrificación. El rango de temperaturas estudiado evidencia un incremento de la actividad de las bacterias nitrificantes y desnitrificantes cuanto más elevadas sean, mejorando la eliminación de amonio y la conversión de nitratos y nitritos. Sin embargo, también pueden aumentar la demanda de oxígeno, lo que plantea desafíos adicionales para el control del proceso. En general, la desnitrificación es más

eficiente a temperaturas elevadas dentro del intervalo estudiado. Una eliminación ineficiente de nitrógeno a bajas temperaturas produce su recirculación a los reactores aerobios, complicando el tratamiento porque aumenta la carga a tratar.

El lazo abierto permitió analizar los efectos de la temperatura sin interferencias derivadas del control de oxígeno, mientras que el lazo cerrado, al incorporar las estrategias de control, revela cómo estas acciones pueden enmascarar o modificar los efectos de la temperatura. Esto ha permitido distinguir el efecto de la temperatura, y su consecuencia sobre otras variables de operación, sobre los procesos biológicos que ocurren en planta. Este conocimiento proporciona una visión clara y precisa de los factores que influyen en la eficacia del tratamiento biológico, y es útil para optimizar las estrategias de control, asegurando un tratamiento más eficiente y robusto de las aguas residuales.

Agradecimientos

Los autores agradecen a: IWA Task Group, IEA Department, Lund University, Sweden (U.Jeppsson, C. Rosen) por el desarrollo y libre distribución del BSM2. Al gobierno de España por los proyectos: PID2019-105434RB-C31, PID2019-105434RB-C33, TED2021-129201B-I00 y MICINNU/AEI/10.13039/501100011033

Referencias

- Alex, J.; Benedetti, L.; Copp, J.; Gernaey, K.; Jeppsson, U.; Nopens, I.; Pons, M.; Rosen, C.; Steyer, J.; Vanrolleghem, P.A. Benchmark Simulation Model No. 2 (BSM2), Technical report No 3. IWA Taskgroup on Benchmarking of Control Strategies for WWTPs. 2018
- Gernaey, K., Jeppsson, U., Vanrolleghem, P., Copp, J., Steyer, J. Benchmarking of control strategies for wastewater treatment plants., IWA Publishing, Colchester, UK, 2010.
- Gernaey, K., Rosen, C., Benedetti, L., & Jeppsson, U. (2021). BSM2: A model for dynamic influent data generation. Wastewater Modelling. Retrieved from <https://wwtmodels.pubpub.org/pub/oz0vnt2l>
- Henze M, Gujer W, Mino T, Van Loosedrecht M (2006) Activated sludge models ASM1, ASM2, ASM2d and ASM3. IWA publishing.
- Pons, M.-N., Alex, J., Benedetti, L., Copp, J. B., Gernaey, K., Jeppsson, U., ... Vanrolleghem, P. (2021). Benchmark Simulation Model no. 1 (BSM1). Wastewater Modelling. Retrieved from <https://wwtmodels.pubpub.org/pub/web0fxkd>
- Jeppsson, U., M. N. Pons, I. Nopens, J. Alex, J. B. Copp, K. V. Gernaey, C. Rosen, J. P. Steyer, and P. Vanrolleghem. Benchmark simulation model no 2: general protocol and exploratory case studies. Water Science and Technology, 2007. 56, p. 67-78.
- Revollar, S.; Meneses, M.; Vilanova, R.; Vega, P.; Francisco, M. Eco-Efficiency Assessment of control Actions in Wastewater Treatment Plants. Water 2021, 13, 612.
- Vanrolleghem, P. A., Batstone, D., & Pons, M.-N. (2021). Temperature effects in BSM1_LT and BSM2. Wastewater Modelling. Retrieved from <https://wwtmodels.pubpub.org/pub/01quq2jb>
- Vilanova, R; Santín, I., Pedret, C. (2017) Control en Estaciones Depuradoras de Aguas Residuales: Modelado y Simulación. Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial (RIAI). 14 (3): 217-233
- Vilanova, R; Santín, I., Pedret, C. (2017) Control en Estaciones Depuradoras de Aguas Residuales: Estado actual y perspectivas. Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial (RIAI). 14 (4): 329-345