

Tratamiento biológico de aguas residuales: nuevas estrategias de control

S. Nájera, J. Rico-Azagra, C. Elvira, M. Gil-Martínez

Departamento de Ingeniería Eléctrica, Universidad de La Rioja, San José de Calasanz 31, 26004 Logroño.

E-mail: {silvano.najera, javier.rico, carlos.elvira, montse.gil}@unirioja.es

Resumen

En este trabajo se estudia el tratamiento biológico en estaciones depuradoras de aguas residuales mediante el Benchmark de Simulación BSM2. Se establecen como indicadores del proceso los relativos al nitrógeno total, el amonio en el efluente y los nitratos. Y como variables manipulables con mayor influencia en los anteriores indicadores: el caudal de purga, el caudal de recirculación interno, el caudal de la fuente de carbono externo, y la referencia de oxígeno disuelto en los tanques de denitrificación. Se analizan la influencia y los rangos de operación más adecuados de las anteriores variables a través de estudios estacionarios. Asimismo, se realizan análisis dinámicos para determinar el uso de variables en estrategias de control. Se propone un control dual del amonio en el efluente manipulando, en bandas de frecuencia diferentes, la recirculación y la concentración de oxígeno. Esto permite también la regulación de la concentración de oxígeno a valores deseados para favorecer la nitrificación-denitrificación o para minimizar gastos. El resto de variables manipulables se emplearían en lazos de control simples.

Palabras clave: EDAR, tratamiento biológico, BSM2, control MISO, control de rango medio

1 INTRODUCCIÓN

A lo largo de los últimos años se han desarrollado diferentes estrategias de control aplicadas a los procesos comúnmente usados en las estaciones depuradoras de aguas residuales (EDAR) para mejorar su rendimiento, tanto en eficiencia y consumo energético como en calidad del agua tratada, para cumplir con las reglamentaciones medioambientales existentes, cada vez más restrictivas. Sin embargo, las plantas de tratamiento de aguas residuales son sistemas altamente no lineales debido a la complejidad de los fenómenos biológicos y bioquímicos, y están sometidas a grandes perturbaciones debido a variaciones en la temperatura, el caudal y las concentraciones de

contaminantes en el influente. Además poseen constantes de tiempo muy dispares, que se mueven desde unos pocos minutos hasta varios días y no existe un criterio universal para la evaluación del *performance* de la planta, dependiendo en todo caso de reglamentaciones locales. Todo ello implica que no sean sistemas fáciles de controlar, evaluar ni comparar.

El desarrollo de diferentes sistemas de control aplicado a estos procesos ha sido posible gracias a un trabajo previo de desarrollo de modelos y *benchmarks* de simulación de los diferentes tratamientos empleados. Entre ellos, el más conocido y ampliamente usado se denomina *Benchmark Simulation Model 2* (BSM2) [4] basado en el BSM1 [1] el cual define un *plant layout* del tratamiento biológico basado en la tecnología de nitrificación con predenitrificación en una combinación habitualmente empleada en plantas reales con 5 tanques (2 anóxicos y 3 aireados). El BSM2 representa una planta completa de tratamiento de aguas residuales, incluyendo tanto la conocida como línea de aguas como también la línea de fangos, donde implementa un modelo de digestor anaerobio. Además, implementa un protocolo para la evaluación del *performance* de la planta, así como unos influentes tipo y unos índices de evaluación concernientes a la calidad del efluente y al coste de la operación, lo que permite establecer comparativas entre las diferentes estrategias de control implementadas. Bajo este *benchmark* de simulación no han sido pocas las estrategias de control llevadas a cabo en trabajos anteriores en la literatura [2]. Por ejemplo, se han desarrollado desde estrategias simples basadas en control realimentado SISO y prealimentado del amonio en el efluente mediante concentración de oxígeno disuelto de los tanques aireados, estructuras en cascada con control del oxígeno disuelto hasta estrategias de control multivariable tipo MIMO o control predictivo basado en modelos.

En este artículo se desarrolla un análisis de la línea de aguas establecida en el BSM2. Se ha partido de este *benchmark* tanto por su cotidianidad de empleo en la literatura de control a nivel de planta como por que tiene en cuenta los caudales recirculados de la línea de fangos del proceso más comúnmente

empleado en plantas medianas y grandes (digestión anaerobia) y pueden tener gran repercusión en la práctica. Este análisis se ha realizado bajo ciertas condiciones del agua residual influente y mediante la manipulación de ciertas variables, lo que permite establecer relaciones entre variables de control y variables controladas aptas para una estructura de control que no se ha aplicado aún a estos sistemas, y que consta de múltiples entradas y única salida controlada. Comúnmente se denomina MISO (*multiple inputs-single output*).

2 BENCHMARK DE SIMULACIÓN BSM2

El *plant layout* del BSM2 (Figura 2) incluye al BSM1 (Figura 1) para el tratamiento biológico mediante el uso del modelo ASM1 [5] y el tratamiento de los fangos mediante digestión anaerobia. También incorpora un decantador primario, un espesador de los fangos del decantador, un digestor anaerobio y un deshidratador. Los líquidos recogidos en el espesador y el deshidratador se recirculan a cabecera de planta.

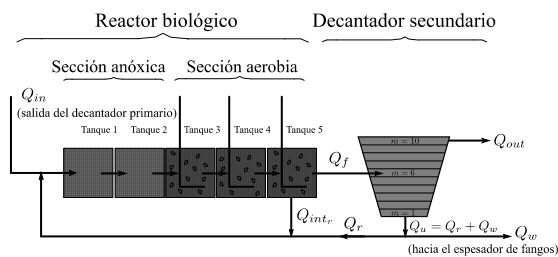


Figura 1: *Plant layout* del BSM1

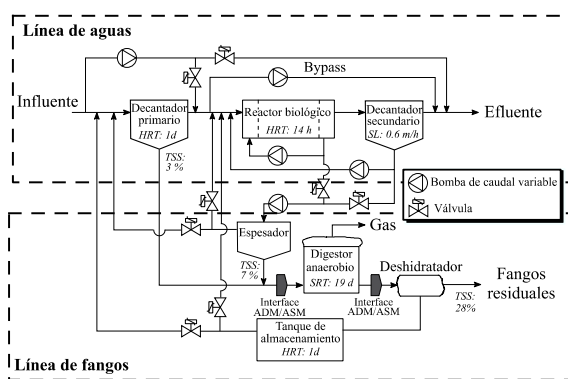


Figura 2: *Plant layout* del BSM2

El tratamiento de los fangos se realiza mediante un digestor anaerobio que se implementa mediante el empleo del modelo ADM1 con algunos cambios para la optimización de tiempo de cálculo durante las simulaciones [8,9]. Además incluye los interfaces

necesarios para convertir las variables del modelo ASM1 a las del modelo ADM1 y viceversa [6].

La planta de tratamiento está diseñada para un influente medio en tiempo seco de 20648,36 m³/d y un contenido medio de *COD* (*chemical oxygen demand*) en el influente de 592,53 g/m³. El tiempo de retención es de 22 horas para el caudal de diseño en tiempo seco teniendo en cuenta el volumen de sus elementos (decantador primario de 900 m³, reactor biológico de 12000 m³, y decantador secundario de 6000 m³).

El reactor biológico de la línea de aguas posee 5 tanques de los cuales los dos primero son no aireados de 1500 m³ cada uno y los 3 últimos son aireados de 3000 m³ cada uno. El coeficiente de transferencia de oxígeno (*KLa*) de cada tanque depende de la temperatura [3].

El decantador secundario tiene un volumen de 6000 m³ y una altura de 4 metros. Está modelado mediante 10 capas sin reacciones biológicas.

La composición del efluente de la planta se basa en la composición del caudal de desborde del decantador secundario y del agua bruta que pudiera desviarse desde la entrada de la planta debido a sobrecaudales.

2.1 CARACTERIZACIÓN DEL INFLUENTE Y OPERACIÓN DEL SISTEMA

El BSM2 incorpora un influente variable durante 609 días y también un influente de valores medios constante utilizado para la estabilización del modelo. Para ello establece la siguiente lista de variables de estado que los definen:

Tabla 1: Variables de estado del modelo ASM1.

Variable	Descripción
<i>Si</i>	Materia orgánica soluble inerte
<i>Ss</i>	Sustrato rápidamente biodegradable
<i>Xi</i>	Materia orgánica particulada inerte
<i>Xs</i>	Sustrato lentamente biodegradable
<i>Xbh</i>	Biomasa activa heterótrofa
<i>Xba</i>	Biomasa activa autótrofa
<i>Xp</i>	Producto particulado del decaimiento de la biomasa
<i>SO</i>	Oxígeno
<i>SNo</i>	Nitratos y nitritos
<i>SNh</i>	Amonio
<i>Snd</i>	Nitrógeno orgánico soluble biodegradable
<i>Xnd</i>	Nitrógeno orgánico particulada biodegradable
<i>Salk</i>	Alcalinidad
<i>TSS</i>	Sólidos en suspensión totales
<i>Qi</i>	Caudal influente
<i>T</i>	Temperatura

La evaluación del *performance* de la planta de tratamiento se realiza durante un año completo (364 días). Además se requiere un periodo de estabilización previo antes de la evaluación. El fichero comienza 63 días antes del 1 de enero. Los

primeros 245 días (63+182) sirven para la estabilización bajo condiciones variables. De esta forma los 609 días (63+182+364=609) del influente variable permiten estabilizar la planta y evaluar el *performance* durante los 364 últimos días.

La inicialización del sistema se puede llevar a cabo desde cualquier conjunto de valores establecidos por el usuario. Sin embargo, se requiere una estabilización durante 500-1000 días usando entradas constantes (influente de composición constante y variables manipulables constantes) para asegurar el funcionamiento correcto del *benchmark* a partir de unas condiciones iniciales siempre idénticas según la Tabla 2.

Tabla 2: Valores del influente constante para el periodo de estabilización.

Variable	Valor	Unidad
$S_i,stab$	27,22619062	g COD/m ³
$S_s,stab$	58,17618568	g COD/m ³
$X_i,stab$	92,49900106	g COD/m ³
$X_s,stab$	363,943473	g COD/m ³
$X_{bh},stab$	50,68328815	g COD/m ³
$X_{ba},stab$	0	g COD/m ³
$X_p,stab$	0	g COD/m ³
$SO,stab$	0	g (-COD)/m ³
$SNo,stab$	0	g N/m ³
$SNh,stab$	23,85946563	g N/m ³
$Snd,stab$	5,651606031	g N/m ³
$Xnd,stab$	16,12981606	g N/m ³
$Salk,stab$	7	mol/m ³
$TSS,stab$	380,3443217	g/m ³
$Q_i,stab$	20648,36121	m ³ /d
$T,stab$	14,85808006	°C

Además se aplican las siguientes condiciones de operación durante el periodo de estabilización:

- Caudal de recirculación interno $Q_{intr} = 61944$ m³/d
- Caudal de recirculación externo $Q_r = 20648$ m³/d
- Caudal de purga $Q_w = 300$ m³/d
- Caudal de aporte de carbono $Q_{carb} = 2$ m³/d
- Concentración de carbono: 400000 gCOD/m³
- Coeficientes de transferencia de oxígeno: $KLa3 = KLa4 = 120$ d⁻¹ y $KLa5 = 60$ d⁻¹

El caudal de purga Q_w se establece con una variación invierno-verano automática según la Tabla 3:

Tabla 3: Valores del caudal de purga en función del tiempo de simulación.

Tiempo (d)	Q_w (m ³ /d)
$0 \leq t < 182$	300
$182 \leq t < 364$	450
$364 \leq t < 546$	300
$546 \leq t < 608$	450

La concentración de oxígeno disuelto en el tanque 4, SO_4 es controlada mediante un controlador PI por defecto y los tanques 3 y 5 se airean de forma proporcional según sus respectivos $KLa3$ y $KLa5$.

Los valores medios de concentraciones en el efluente, están limitados por normativa según la Tabla 4.

Tabla 4: Límites de calidad en el efluente.

Variable	Valor
N_{tot}	<18 g N/m ³
COD_{tot}	<100 g COD/m ³
SNh	<4 g N/m ³
TSS	<30 g SS/m ³
$BOD5$	<10 g BOD/m ³

El índice que representa el nitrógeno total N_{tot} es calculado como la suma de S_{no} y SN_{kj} , donde SN_{kj} es la concentración de nitrógeno $Kjeldahl$.

El índice que representa el conjunto de sólidos en suspensión totales se calcula según la siguiente ecuación:

$$TSS = 0.75 (X_s + X_i + X_{bh} + X_{ba} + X_p) \quad (1)$$

2.2 VARIABLES MANIPULABLES

Por razones de simplicidad, todas las variables manipulables se consideran ideales (sin dinámicas) con respecto a su comportamiento. En la implementación del BSM2 se tienen en cuenta las variables que aparecen en la Tabla 5 para permitir una mayor flexibilidad en la implementación de nuevas estrategias de control, aunque en la práctica no estén disponibles todas ellas. Algunas de ellas presentan limitaciones inherentes a su diseño y dimensionamiento.

Tabla 5: Variables manipulables disponibles.

Variable	Valor máximo	Comentarios
Caudal de recirculación interno - $Q_{intr}(m^3/d)$	309720	Max = 500% de $Q_{inf,stab}$
Caudal de recirculación externo - $Q_r(m^3/d)$	41295	Max = 200% de $Q_{inf,stab}$
Caudal de purga - $Q_w(m^3/d)$	1844,6	Max = 10% de $Q_{inf,stab}$
Intensidad de aireación - $KLa_i(d^{-1})$	240	Reactor 3, 4 y 5
Fuente de carbono externa - $Q_{carb}(m^3/d)$	5	400000 gCOD/m ³
Fración de distribución de influente - f_{Qi}		Reactor 1, 2, 3, 4 y 5
Fración de distribución de recirculación interna - f_{Qintri}		Reactor 1, 2, 3, 4 y 5

Fracción de distribución de fango de retorno - f_{Qr}		Reactor 1, 2, 3, 4 y 5
Caudal de escurrido - $Q_{st, set}$		Escurrido Deshidratación

El sistema de aireación no ideal ($KLa1$ - $KLa5$) se define con dinámicas significativas, añadiendo un filtro de segundo orden. Se considera un tiempo de respuesta de 4 minutos [7]. Por tanto el filtro se implementa con dos constantes de tiempo de primer orden con $\tau = \tau / 3.89 = 1.03$ min.

3 ANÁLISIS DEL SISTEMA

El objetivo del análisis del sistema es comprobar cuál es el rango de controlabilidad del mismo mediante cada una de las variables manipulables, y el establecimiento de relaciones entre las variables de control y las variables manipulables establecidas para después diseñar una estrategia de control. Considerando todo lo dispuesto en el *BSM2* se debe establecer un marco acotado para realizar el análisis del sistema y establecer las variables objeto de estudio.

3.1 EXPERIMENTOS ESTACIONARIOS

Como indicadores del sistema o variables susceptibles de ser controladas se establecen las siguientes, tanto por su representatividad como por su repercusión en la literatura anterior:

- Amonio en el tanque 5 - $SNh5$
- Nitratos en el tanque 2 - $SNo2$
- Nitrógeno total en el tanque 5 - $Ntot$
- Sólidos en suspensión totales en el tanque 5 - TSS

De igual forma se acotan las variables manipulables a las siguientes:

- Caudal de purga - Q_w
- Caudal de fuente externa de carbono en tanque 1 - Q_{carb1}
- Caudal de recirculación interna - Q_{intr}
- Oxígeno disuelto en el tanque 4 - $SO4$

También se estudian otras variables internas del sistema que aportan información valiosa del estado del mismo.

- Biomasa heterótrofa en el tanque 5 - Xbh
- Biomasa autótrofa en el tanque 5 - Xba
- Demanda química de oxígeno total - $CODtot$

La demanda química de oxígeno total se calcula según la siguiente ecuación:

$$CODtot = Ss + Si + Xs + Xi + Xbh + Xba + Xp \quad (2)$$

La Figura 3 representa el conjunto de combinaciones de las variables manipulables que se simularán. La Tabla 5 detalla los valores exactos de dichas variables. Antes de aplicar cada combinación de valores, se inicializa el sistema tal y como marca el protocolo *BSM2* para el análisis del sistema con influente de características constantes. Se incluye el control de oxígeno disuelto en el tanque 4 por defecto. Se fija Q_r a 20648 m³/d. Se establece un periodo de 100 días partiendo de los estados iniciales estables por defecto para cada simulación ya que se comprueba que con 100 días es suficiente para que todas las variables del sistema lleguen a régimen estacionario con influente y variables de manipulación constantes. A continuación, se aplica la combinación pertinente de las 54 reflejadas en la Figura 3. Recogiéndose valores cada 15 minutos durante 100 días, se toma la media aritmética de las 100 últimas muestras de cada periodo de 100 días. Dichos resultados estacionarios para cada combinación de entradas se muestran en la Figura 4.

Tabla 6: Valores simulados de variables manipulables en estudio.

Variable	Rango
Q_w	[300,450] m ³ /d
Q_{carb1}	[1,2,3] m ³ /d
Q_{intr}	[51620,61945,72269] m ³ /d
$SO4$	[1,2,3] mg(-COD)/l

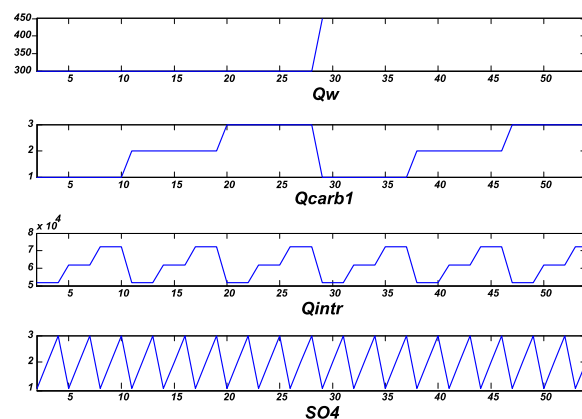


Figura 3: Variaciones de variables manipulables

Se aprecia que todas las variables estudiadas son sensibles a cambios en Q_w , cuyo principal efecto se traduce en una disminución de biomasa, y los efectos adversos que conlleva esta reducción, se pueden apreciar en el aumento de $SNo2$. Asimismo, el cambio en Q_{carb1} se aprecia en todas las variables excepto en Xba . Por último, los cambios en Q_{intr} y en $SO4$ son prácticamente inapreciables en biomazas, $CODtot$ y TSS mientras que se aprecian notablemente tanto en $SNh5$ como en $SNo2$, debido al cambio

indirecto del tiempo de retención y el carácter aerobio de la nitrificación.

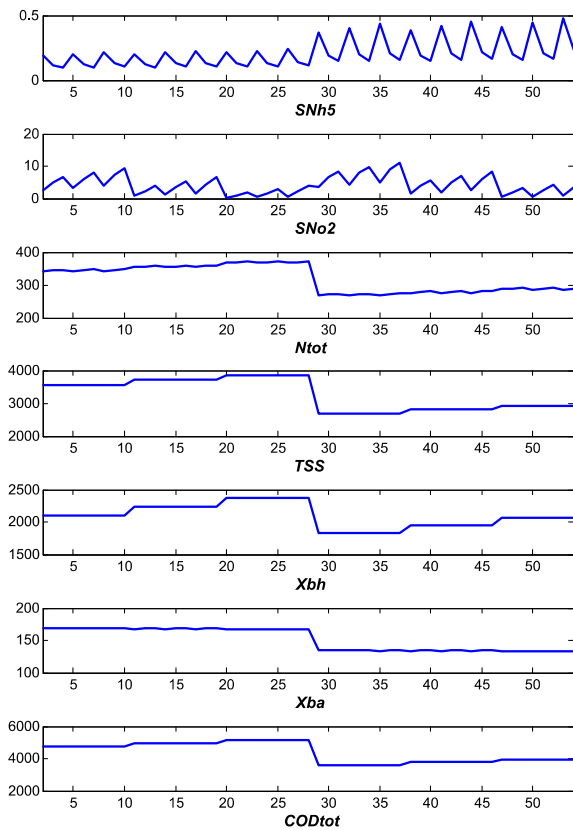


Figura 4: Valores estacionarios de indicadores del sistema

3.2 ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD

Para establecer relaciones entre las variables de control y las variables manipulables, se trazan gráficos de dispersión con todos los datos de puntos de operación generados en el apartado anterior. Al trazar las gráficas de $SNh5$ respecto a las entradas (variables manipuladas) según la Figura 5, se observa una variabilidad leve y moderada respectivamente con respecto a $Qcarb1$ y $Qintr$, existiendo una variabilidad más pronunciada con respecto a Qw y a $SO4$, lo que indica que estas últimas son variables altamente indicadas para un control del indicador $SNh5$, aunque las todas ellas pueden ser consideradas en un sistema de control.

De igual forma, según la Figura 6 se observa una relación de variabilidad alta entre $SNo2$ y las variables manipulables $Qcarb1$, $Qintr$ y $SO4$. Asimismo, también se observa una relación prácticamente despreciable frente a Qw . Estos datos arrojan un posible control multivariable con 2 o 3 variables manipulables.

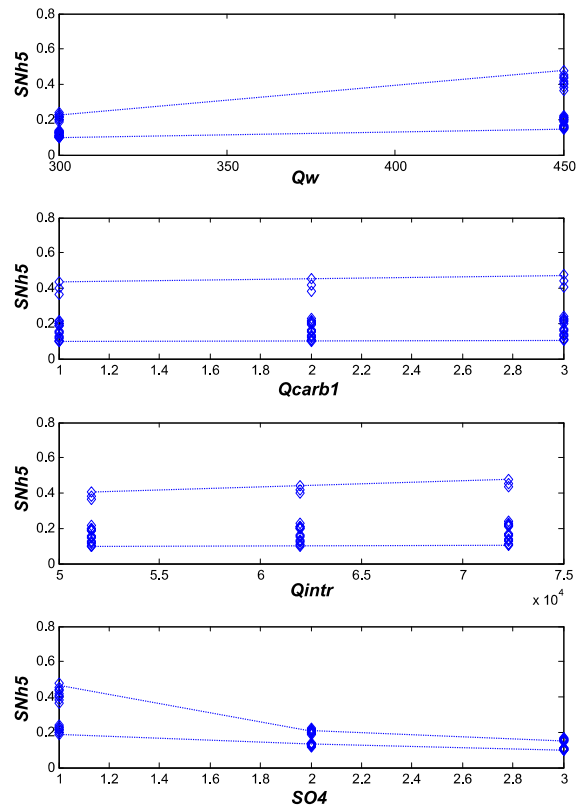


Figura 5: Diagramas de dispersión de $SNh5$ respecto a variables manipuladas

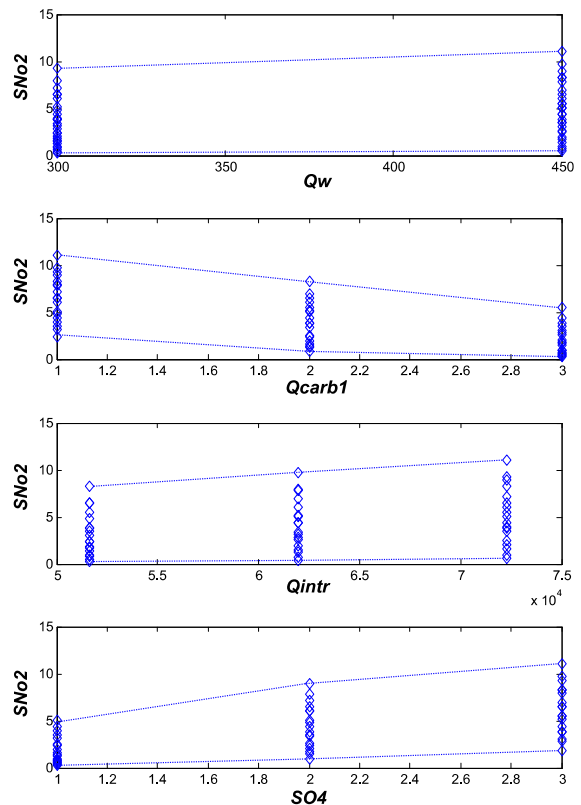


Figura 6: Diagramas de dispersión de $SNo2$ respecto a variables manipuladas

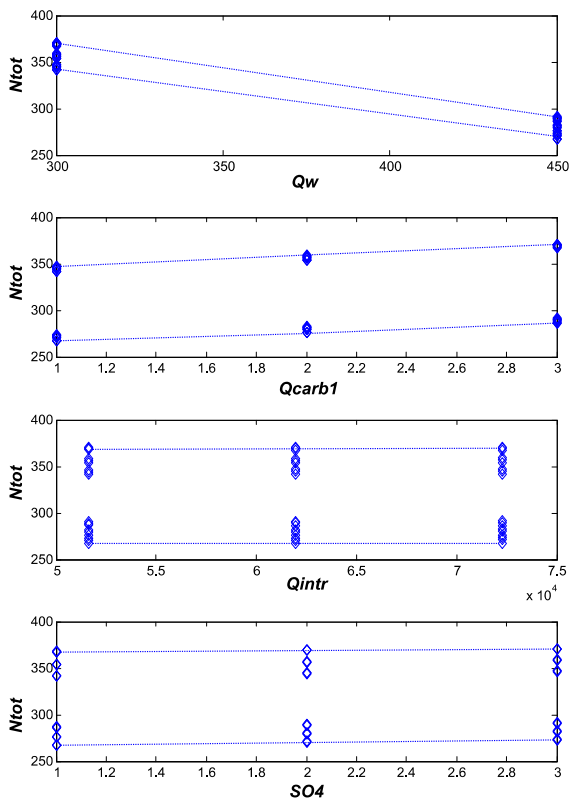


Figura 7: Diagramas de dispersión de N_{tot} respecto a variables manipuladas

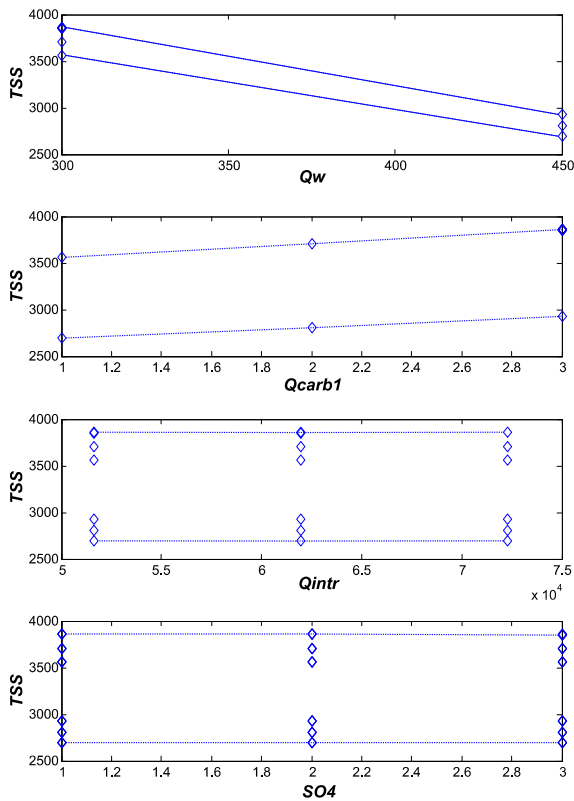


Figura 8: Diagramas de dispersión de TSS respecto a variables manipuladas

En la Figura 7 se desprende una relación muy acentuada del indicador N_{tot} con la variable manipulable Q_w . Esto es debido a que las biombras almacenan una gran cantidad de compuestos nitrogenados que se computan en el indicador evaluado. También existe una relación pobre con la variable Q_{carb1} . El indicador N_{tot} representa la cantidad de compuestos nitrogenados totales y se calcula como la suma de SN_o y SN_{Kj} o concentración de nitrógeno *Kjeldahl*.

Por último, según la Figura 8, donde se analizan las relaciones entre TSS y las diferentes variables manipulables, se desprende que existe una gran relación de variabilidad con respecto a Q_w , lo que nos indica que es posible controlar TSS a través de dicha variable manipulada. También se aprecia una relación moderada con respecto a Q_{carb1} , no siendo influenciada por Q_{intr} ni SO_4 .

3.3 ANÁLISIS DINÁMICO Y ESTRATEGIAS DE CONTROL

Se analiza la influencia dinámica de tres de las variables manipulables: SO_4 , Q_{intr} y Q_{carb1} . Para ello se inicializa el sistema durante 100 días, se aplica una variación de tipo escalón en una de las tres variables anteriores y se recoge la evolución dinámica de los principales indicadores del sistema cada 15 mn. El experimento se repite para cambios en las otras dos variables manipulables.

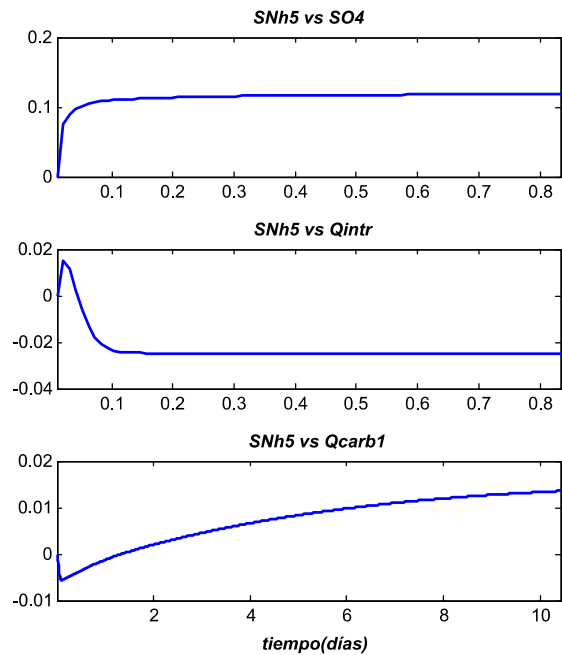


Figura 9: Dinámica de la variable SN_{h5} para cambios en las variables manipulables SO_4 , Q_{intr} y Q_{carb1}

Los resultados de evolución de la variable amonio en el tanque 5 ($SNh5$) se muestran en la Figura 9. Estos resultados se representan debidamente escalados de acuerdo al rango de variación de cada variable de entrada para poder establecer comparaciones. Puede observarse como la variable con mayor potencial estacionario para controlar $SNh5$ es $SO4$, además de ser la de respuesta más rápida. Se observan comportamientos de fase no mínima al variar tanto $Qintr$ como $Qcarb1$.

Sin embargo, a pesar de ser $SO4$ la mejor variable para controlar $SNh5$, también podría emplearse $Qintr$. En régimen permanente demandaría una mayor acción de control, ya que su ganancia estática es menor que la de $SO4$. Sin embargo, el coste económico que supone $SO4$ puede ser mayor que el que implica $Qintr$, ya que en el primer caso supone la aportación de altas cantidades de aire para conseguir una cierta concentración de oxígeno disuelto, mientras que el segundo consiste en una recirculación de caudal. Esto sugiere la utilización de un control de múltiple entrada simple salida (MISO), tal y como refleja la estructura de la Figura 10. Este control también se conoce en la literatura como control de rango medio. En él una de las variables de entrada ($SO4$) tras intervenir dinámica en el rechazo de una perturbación vuelve a un punto de operación de interés ($SO4ref$) a medida que la otra variable manipulable ($Qintr$) se apodera del régimen estacionario. Nótese que respecto a un control MIMO esto no supone la pérdida de un grado de libertad controlado. Ahora, en vez de regularse dos variables de salida (o indicador) a cierta referencia, se regulan una salida y una acción de control a las referencias deseadas. En nuestro caso el valor $SO4ref$ se puede elegir convenientemente o bien para un gasto moderado de oxígeno o bien para otros objetivos. De hecho, tal y como muestran las gráficas del estudio estacionario de las secciones anteriores, un valor mayor de $SO4$ favorece la disminución de $SNh5$ y la generación de más $SN05$, ambos en el tanque 5, y por tanto, para la misma recirculación, una mayor concentración de $SN02$ en la zona de denitrificación donde se elimina el nitrógeno. Por tanto, $SO4ref$ mayores permiten una mayor calidad del tratamiento DN, mientras que $SO4ref$ menores buscan economizar el gasto de oxígeno.

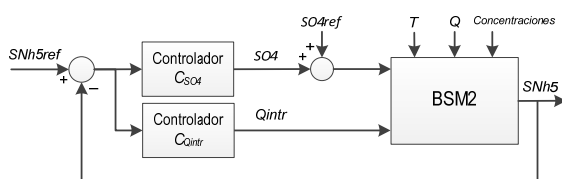


Figura 10: Estructura de control MISO

Por otro lado, y como lazos de control totalmente desacoplados se propone: (a) la intervención de

$Qcarb1$ para mantener una concentración de bacterias en caso de influentes con poca carga orgánica (b) la utilización del Qw para regular niveles adecuados de TSS.

4 CONCLUSIONES

Se han analizado las variables manipulables recogidas en el BSM2 que son susceptibles de utilización en una posible estrategia de control basada en una arquitectura MISO que no ha sido explotada hasta la fecha. Ésta permitiría regular la concentración final de amonio manipulando tanto el caudal de recirculación como la concentración de oxígeno en la zona de denitrificación, pero en bandas frecuenciales diferentes (la segunda es la variable rápida y la primera la que domina en el régimen estacionario). Esto, además, permitiría que la variable manipulable rápida (concentración de oxígeno en la denitrificación) volviera a cierta referencia deseada. El gestor de planta podrá modificar ésta convenientemente, bien para economizar el gasto (reducción de aireación), o bien para indirectamente mejorar la calidad del efluente (concentración de nitratos) a expensas de un mayor gasto de aireación.

Agradecimientos

Los autores agradecen la ayuda prestada por el Ministerio de Economía y Competitividad del Gobierno de España a través del proyecto de investigación DPI2016-77271-R, y la ayuda prestada por la Universidad de La Rioja a través de la Ayuda a Grupos de Investigación REGI 2018/42.

English summary

Biological wastewater treatment: new control strategies

Abstract

In this work, the biological treatment in sewage treatment plants is studied through the BSM2 Simulation Benchmark. The indicators of the process are those related to total nitrogen, ammonium in the effluent and nitrates. And as manipulable variables with greater influence on the previous indicators: the purge flow rate, the internal recirculation flow rate, the flow rate of the external carbon source, and the dissolved oxygen reference in the denitrification tanks. The influence and the most adequate ranges of operation of the previous variables are analyzed through stationary studies. Likewise, dynamic tests are carried out to determine the use of variables in control strategies. It is proposed a dual control of the ammonium in the effluent by manipulating, in different frequency bands, the recirculation and

oxygen concentration. This also allows the regulation of the oxygen concentration at desired values to favor nitrification-denitrification or to minimize costs. The rest of the manipulable variables would be used in simple control loops.

Keywords: WWTP, biological treatment, BSM2, MISO control, mid-ranging control

Referencias

- [1] Alex J., Benedetti L., Copp J., Gernaey K.V., Jeppsson U., Nopens I., Pons M.N., Steyer J.P. and Vanrolleghem P., (2009) Benchmark Simulation Model no. 1 (BSM1). In: Technical report noof the Scientific and Technical Report, IWA Publishing, London.
- [2] Åmand, L., Olsson, G., & Carlsson, B., (2013) Aeration control - A review. *Water Science and Technology*, 67(11), pp. 2374-2398. doi:10.2166/wst.2013.139
- [3] ASCE, (1993) A standard for the measurement of oxygen transfer in clean water. ASCE Transfer Standard Committee, New York, NY, USA.
- [4] Jeppsson U1, Pons MN, Nopens I, Alex J, Copp JB, Gernaey KV, Rosen C, Steyer JP, Vanrolleghem PA., (2007) Benchmark simulation model no 2: general protocol and exploratory case studies. *Water Science and Technology*, 56(8), pp. 67-78.
- [5] Henze M., Grady Jr C.P.L., Gujer W., Marais G.v.R. and Matsuo T., (1987) Activated Sludge Model n° 1, IAWQ Scientific and Technical Report n°1, IAWQ, London, UK.
- [6] Nopens I., Alex J., Batstone D., Copp J., Dudley J., Pons M.-N., Vanrolleghem P.A, Volcke E.I.P. and Jeppsson U., (2009) ASM/ADM/ASM interfaces for BSM2. In: Technical report noof the Scientific and Technical Report, IWA Publishing, London.
- [7] Rieger L., Alex J., Gujer W. and Siegrist H., (2005) Modelling of aeration systems at wastewater treatment plants. *Proc. of the 2nd IWA Conference on Instrumentation, Control and Automation*, Busan, Korea.
- [8] Rosen C., Vrecco D., Gernaey K.V., Pons M.-N. and Jeppsson U., (2006) Implementing ADM1 for plant-wide benchmark simulations in Matlab/Simulink. *Water Science and Technology*, 54(4), pp. 11-19.
- [9] Rosen C. and Jeppsson U., (2009) Aspects on ADM1 implementation within the BSM2 framework. In: Technical report noof the Scientific and Technical Report, IWA Publishing, London.



© 2018 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution CC-BY-NC 3.0 license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>).