

Optimización por Simulación de Estrategias de Operación para la EDAR de Galindo

de la Sota Zubillaga, Alejandro. CABB (Consorcio de Aguas Bilbao Bizkaia)

Beltrán Calaff, Sergio. CEIT y Tecnun (Universidad of Navarra)

Ayesa Iturrate, Eduardo. CEIT y Tecnun (Universidad of Navarra)

SUMARIO

Las plantas depuradoras de aguas residuales (EDAR) requieren un aporte significativo de energía. Se espera además que este consumo energético se incremente en los próximos años debido a la construcción de nuevas plantas y a la necesidad de remodelar las ya existentes para cumplir con nuevos estándares más restrictivos sobre la calidad del efluente vertido. A ello se suma el hecho de que el precio de la energía eléctrica es cada vez mayor. En este contexto ecológico y económico, mejorar la ecoeficiencia en la explotación de las plantas es hoy un reto ineludible. Con esta finalidad, se pueden llevar a cabo acciones dirigidas a optimizar la operación y control de la planta cuyos resultados cualitativos en la calidad del vertido final y en los costes de operación pueden ser conocidos a priori. Sin embargo, toda oportunidad de optimización se desvanece si se desconocen los efectos en términos cuantitativos que pudieran ayudar en la toma de decisiones. Este hecho es especialmente importante en grandes EDAR, en las que la carga contaminante del vertido final tiene una gran relevancia en el medio receptor, y la energía consumida en los costes de explotación. Es necesario tener en cuenta que la optimización de una estación depuradora no es una tarea sencilla debido a que una planta es en realidad un conjunto heterogéneo de sistemas y procesos interrelacionados de gran complejidad y de tiempos de respuesta muy diferentes.

Con el fin de resolver esta problemática y optimizar la explotación de la EDAR de Galindo en coste energético y calidad del efluente, este texto presenta una herramienta de simulación dinámica especialmente diseñada para la planta, que permite explorar nuevas estrategias de operación y control de una manera precisa y cuantificable.

El simulador se basa en un modelo matemático dinámico y detallado que incluye los siguientes procesos y sistemas: el proceso biológico, que engloba las principales transformaciones de planta que describen la eliminación de carbono y nitrógeno en condiciones aerobias y anóxicas; el proceso de transferencia de oxígeno de la fase gaseosa (burbuja) a la fase líquida (licor mezcla); el sistema de distribución de aire, que incluye la pérdida de presión que se produce en tuberías, difusores, válvulas y elementos necesarios para transportar y distribuir el aire desde el equipo de compresión hasta los difusores; el sistema de compresión de aire, que está formado por el equipo de soplantes; el sistema de bombeo hidráulico de las recirculaciones y purga; el sistema de control e instrumentación de planta (sensores y analizadores); y, por último, el sistema tarifario actualmente vigente.

El modelo matemático es convenientemente calibrado y el agua residual de entrada caracterizada. La validación experimental posterior del modelo permite garantizar su utilidad para explorar con rigor una amplia variedad de escenarios de trabajo. De este modo, se presentan los resultados más relevantes de un estudio sistemático y exhaustivo de simulación que obtiene nuevas estrategias de operación y control que optimizan la EDAR de Galindo en cuanto a calidad del efluente vertido y eficiencia energética. Como resultado, un ahorro económico medio del 13.3 % (115 k€/año) ha sido estimado

mediante la optimización de la operación y el control de la planta y sin costes adicionales significativos.

PALABRAS CLAVE

EDAR; eficiencia energética; energía; modelado matemático; operación y control; optimización; simulación numérica

INTRODUCCIÓN

La necesidad de mejorar la eficiencia energética es actualmente un objetivo general para cualquier proceso industrial. Las estaciones depuradoras de aguas residuales (EDAR) requieren en particular un aporte significativo de energía. En concreto, la depuración de las aguas residuales producidas en España supuso el 1 % del consumo energético nacional (OPTI 2010). Hay que tener en cuenta, además, que la demanda de energía en este sector se incrementará a lo largo del tiempo debido a distintos factores, entre los que se incluyen el incremento de la población y la carga contaminante a tratar, así como la necesidad de alcanzar nuevos estándares de calidad más exigentes en el vertido final tratado. A ello se suma el hecho de que el precio medio de la energía nacional se ha visto incrementado considerablemente en los últimos años, desde 0.0520 €/kWh en el año 2002 hasta 0.1152 €/kWh en la actualidad (EUROSTAT 2012).

En este contexto económico, la optimización del control y de la operación de las estaciones depuradoras se convierte en parte indispensable del proceso de transformación económico actual. No obstante, es necesario tener en cuenta que una estación depuradora de aguas residuales es un conjunto heterogéneo de sistemas y procesos interrelacionados de gran complejidad y de tiempos de respuesta muy diferentes. Por esta razón, los encargados de la operación de las plantas son generalmente cautos a la hora de adoptar nuevas acciones que puedan entrañar cierta incertidumbre en el comportamiento de la misma. Este hecho es especialmente importante en grandes EDAR, en las que la carga contaminante del vertido final tiene una gran relevancia en el medio receptor, y la energía consumida en los costes de explotación. Así, toda oportunidad de mejora se disipa si no se ofrece de una manera precisa y cuantificable información a priori de los efectos de estos cambios.

En este sentido, el modelado matemático y la simulación numérica de los diferentes procesos que forman parte de una EDAR han demostrado en los últimos años ser herramientas de gran potencial en la operación y control de las EDAR. Por ejemplo, tradicionalmente su utilización se ha centrado en estudios puntuales para la detección y el diagnóstico de posibles problemas de operación o limitaciones del proceso (detección de las sobrecargas y los “cuellos de botella” del proceso, inconsistencias en los balances de masa, contraste de los datos experimentales, etc.) o en el establecimiento de criterios generales de operación. Actualmente, su progresiva utilización como herramienta de apoyo en el día a día de la explotación de la planta es cada vez más frecuente, sirviendo de eficaz apoyo en la definición y exploración de las estrategias de operación más adecuadas ante los diferentes escenarios y perturbaciones que pueden aparecer en una EDAR. No obstante, la utilización eficiente de los simuladores de operación de EDAR requiere que el modelo matemático esté calibrado y sea lo suficientemente descriptivo como para predecir de forma realista el comportamiento dinámico de la planta estudiada. En concreto, aunque es indudable la repercusión que tienen los sistemas de aireación en la estabilidad, la calidad del vertido y los costes de operación, el modelo matemático de

estos sistemas sigue siendo aún una tarea incompleta y en la mayoría de ocasiones de resultados poco realistas.

OBJETIVOS

El Consorcio de Aguas Bilbao Bizkaia (CABB) ha desarrollado en colaboración con el Centro de Estudios e Investigaciones Técnicas de Gipuzkoa (CEIT) una herramienta de simulación a medida para la EDAR de Galindo, que permite explorar nuevas estrategias de operación y control de una manera precisa y cuantificable, con especial énfasis en la reproducción de los costes operacionales.

MATERIALES Y MÉTODOS

Descripción de la Planta

La EDAR de Galindo está diseñada para eliminar biológicamente el carbono y nitrógeno de un caudal de agua residual de 345,600 m³/d (1.5 Mhe). Para ello, el tratamiento secundario se divide en seis líneas independientes que operan en la configuración regeneración-desnitrificación-nitrificación (Galarza *et al.* 2001; Rivas *et al.* 2001). La composición media anual en términos de materia orgánica, nitrógeno amoniacal y sólidos suspendidos es de 316 g DQO/m³ ± 66 g DQO/m³, 23 g N/m³ ± 6 g N/m³ y 112 g SS/m³ ± 22 g SS/m³, respectivamente. La planta está diseñada para una calidad del efluente vertido de 2 g N/m³ de nitrógeno amoniacal, 10 g N/m³ de nitratos y 20 g SS/m³ de sólidos suspendidos totales.

El sistema de aireación está gobernado por cuatro soplantes que trabajan en paralelo para mantener constante la presión de impulsión, mientras que la válvula de aire de cada reactor aireado regula automáticamente la concentración de oxígeno disuelto en aquel mediante controladores realimentados. A su vez, la consigna de la concentración de oxígeno disuelto de cada línea está gobernada en virtud de la discrepancia existente entre el valor de nitrógeno amoniacal medio diario seleccionado por el operador y el medido experimentalmente al final de la zona de nitrificación (Suescun *et al.* 2000). La aireación consume 9629 MWh al año, lo que representa el 21 % de los requerimientos energéticos de la planta.

El caudal de recirculación interna se regula automáticamente con el fin de mantener en un valor bajo la concentración de nitratos al final de la zona anóxica, agotando así el potencial de desnitrificación y, por tanto, maximizando la eliminación anóxica de materia orgánica (Suescun *et al.* 2000). El caudal de purga puede controlarse para mantener dentro de un rango prefijado la masa de sólidos en los reactores biológicos (Suescun *et al.* 2000). Los controladores avanzados de nitrógeno amoniacal, nitratos y masa de sólidos han demostrado ser, desde su implantación, una gran mejora para la estabilidad, comportamiento y costes operacionales del proceso, logrando así un ahorro energético alrededor del 15 % (Grau *et al.* 2004; Ayesa *et al.* 2006).

Diseño y Desarrollo del Modelo Matemático

El modelo matemático desarrollado específicamente para explorar nuevas estrategias de operación y control en el tratamiento secundario de la EDAR de Galindo se divide en siete submodelos interconectados (Figura 1), desde el origen (consumo energético) al objetivo final (calidad del efluente).

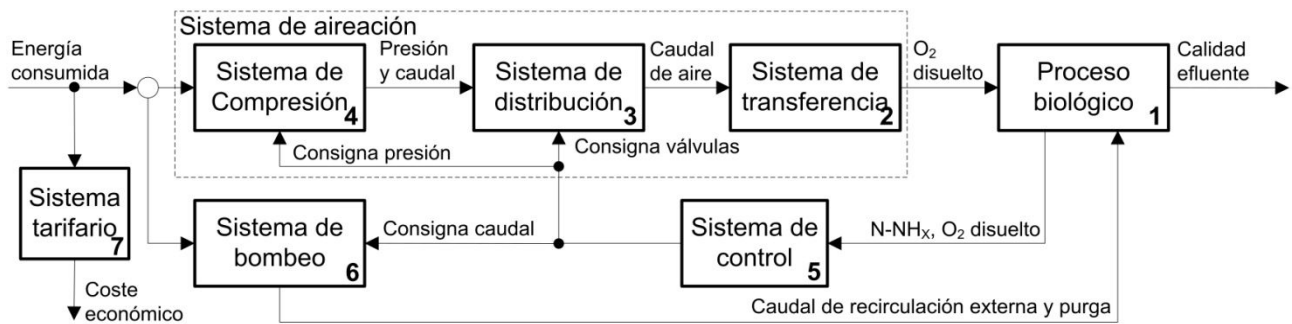


Figura 1 Estructura del modelo matemático completo de la EDAR de Galindo

El modelo del proceso biológico (Bloque nº 1) incluye las principales transformaciones de planta que describen la eliminación de carbono y nitrógeno en condiciones aerobias y anóxicas. Para ello, se emplea el modelo ASM1 (Henze *et al.* 2000) con las modificaciones propuestas por Hauduc (2010). El modelo ASM1 ha sido ampliamente utilizado en los últimos años por ingenierías y consultorías especializadas para el diseño y la operación de plantas depuradoras.

El modelo del sistema de aireación se ha dividido en tres submodelos (Bloque nº 2, 3 y 4). El primer submodelo corresponde a la transferencia de oxígeno (Bloque nº 2) y relaciona el caudal de aire que se suministra a cada reactor con la concentración de oxígeno disuelto en aquel. Para ello, se tienen en cuenta los siguientes factores: el tipo de difusor de aire, el número y la profundidad a la que se encuentran instalados; la temperatura del líquido; las condiciones atmosféricas de temperatura, presión y humedad relativa; el volumen del líquido en el reactor; y otras características del aire tales como la densidad, masa molar y fracción molar de oxígeno. Se aplican además factores de corrección en función del estado físico de los difusores y de las características del licor mezcla.

El submodelo correspondiente al sistema de distribución de aire (Bloque nº 3) obtiene el caudal de aire que se suministra a cada reactor en función de la presión de impulsión de las soplantes y de la apertura de la válvula de aire correspondiente al reactor. Para ello, se calcula dinámicamente la pérdida de presión que se produce en las tuberías, difusores, válvulas y elementos necesarios para transportar y distribuir el aire desde el equipo de compresión hasta los difusores. El resultado del modelo es una superficie no lineal de caudales de aire por reactor (Q) que es en función del grado de apertura de su válvula de control de aire (V) y de la presión de impulsión de las soplantes (p) (Figura 2).

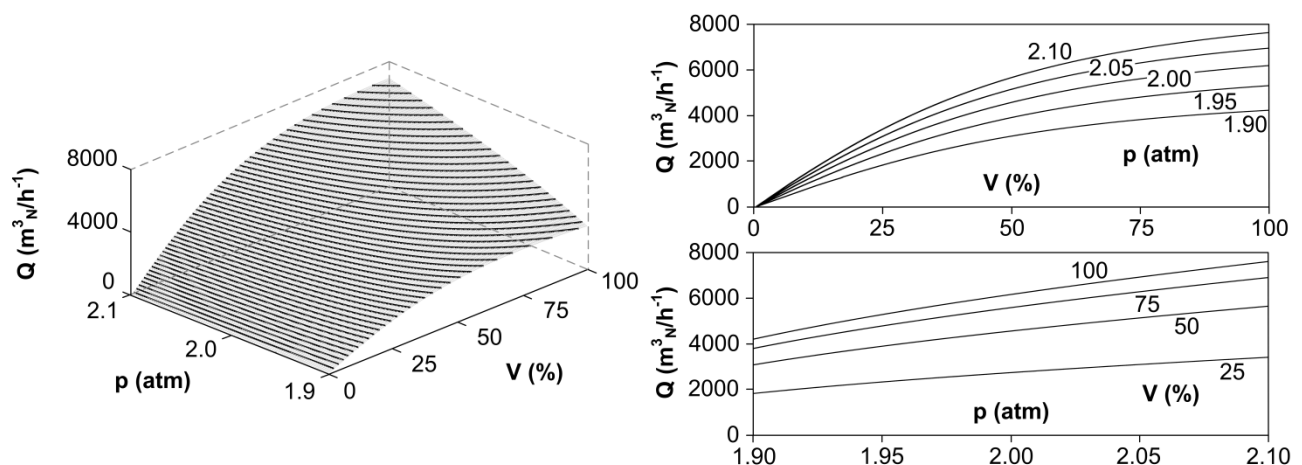


Figura 2 Ejemplo visual del resultado del modelado del sistema de distribución de aire

El modelo del sistema de compresión de aire (Bloque nº 4) obtiene la potencia eléctrica absorbida por las soplantes (centrífugas) en función del caudal de aire suministrado al proceso biológico y la presión de impulsión a la que trabajan las soplantes. El modelo matemático que describe esta relación viene definido por la compresión adiabática del aire, en la que se tienen en cuenta los datos atmosféricos de temperatura, presión y humedad relativa recogidos de estaciones meteorológicas cercanas a la planta (Euskalmet 2012).

El modelo del sistema de control (Bloque nº 5) incluye los algoritmos específicos de los controladores reales de oxígeno disuelto, nitrógeno amoniacal, nitratos y masa de sólidos. Los modelos de la instrumentación de planta también se encuentran recogidos en este modelo, los cuales incluyen ruido blanco para las señales, tiempos de respuesta de los sensores y analizadores y la señal “discreta” de los analizadores de nitrógeno amoniacal y nitratos.

El modelo del sistema de bombeo (Bloque nº 6) describe la energía consumida en el bombeo hidráulico de los caudales de recirculación interna y de purga, en función de la altura de cota elevada y el rendimiento variable de cada bomba.

Por último, el modelo del sistema tarifario (Bloque nº 7) cuantifica económicamente la energía eléctrica consumida por el equipo de compresión de aire y el equipo de bombeo hidráulico, de acuerdo al precio del término de energía aplicable a cada uno de los seis períodos tarifarios en los que se distribuye horariamente el año (BOE 2007).

Validación de la Capacidad Predictiva del Simulador

La reproducción dinámica de los requerimientos de oxígeno requiere de una exhaustiva caracterización del agua residual y calibración del modelo biológico. De esta forma, la fracción orgánica soluble biodegradable fue estimada mediante varios ensayos discontinuos que midieron la tasa de utilización de oxígeno, resultando en un 30 % respecto a la materia orgánica filtrada. La fracción orgánica soluble inerte fue estimada en un 20 % en función de la concentración de DQO filtrada en el efluente de la planta. Por último, la fracción orgánica inerte particulada fue ajustada al 20 % respecto a la materia orgánica particulada para simular correctamente la concentración de sólidos suspendidos volátiles en los reactores biológicos. Es importante observar aquí que una estimación apropiada de la edad celular del fango fue posible gracias a que el fango en exceso se extrae directamente de los reactores biológicos. Finalmente, las variaciones dinámicas de los compuestos orgánicos fueron obtenidas considerando como valor medio diario la concentración analizada de DQO sobre muestra compuesta, y sus variaciones según la señal obtenida por un sensor de DQO basado en absorción ultravioleta. La concentración de nitrógeno amoniacal fue obtenida de un analizador de amonio instalado en la entrada a la planta.

Una vez caracterizada el agua de entrada, se calibraron los parámetros cinéticos del modelo biológico. Primeramente, la tasa máxima de crecimiento de los organismos autótrofos fue estimada en 0.7 1/d mediante ensayos discontinuos que midieron la tasa de producción de nitratos (Melcer *et al.* 2003). El coeficiente de semisaturación del nitrógeno amoniacal fue ajustado a 0.7 g N/m³ para incrementar la nitrificación a bajas concentraciones de amonio. La Figura 3 muestra los resultados obtenidos por simulación (en color negro) de la concentración de nitrógeno amoniacal en el último reactor de nitrificación en comparación con la medida experimentalmente en planta (en color gris).

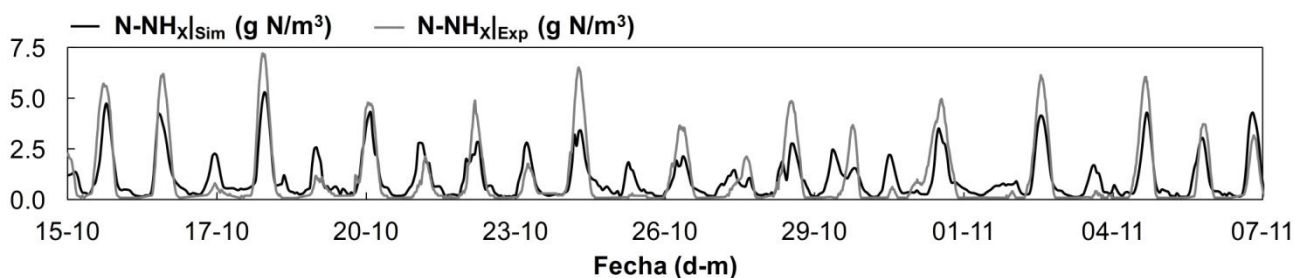


Figura 3 Concentración instantánea de nitrógeno amoniacal en el último reactor de nitrificación

La Figura 4 presenta la validación experimental del modelo biológico para un año de operación. La gráfica superior muestra la simulación de la concentración de nitratos (en línea negra) y la concentración media diaria de nitrógeno amoniacal (en línea gris) en el efluente de la planta comparadas con las muestras analizadas en el laboratorio (puntos). La segunda gráfica muestra la simulación de la concentración de sólidos suspendidos totales (en línea negra) y volátiles (en línea gris) en los reactores de la zona de regeneración y nitrificación comparadas con las muestras analizadas en el laboratorio (puntos).

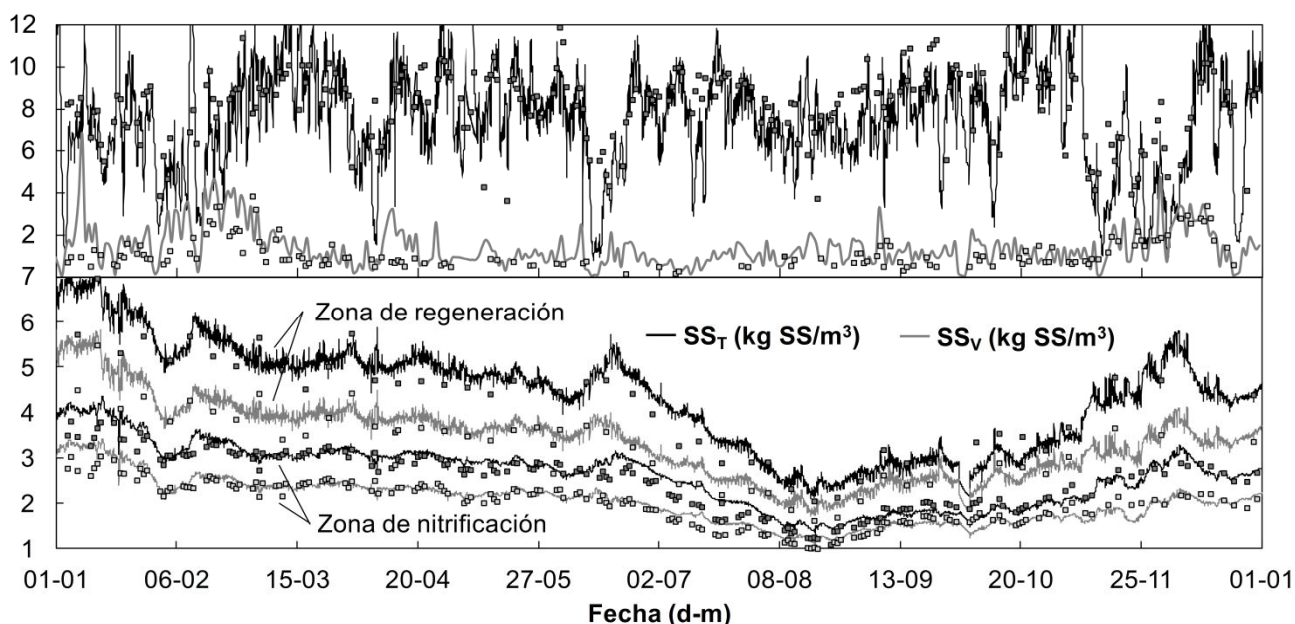


Figura 4 Concentración de nitratos y nitrógeno amoniacal en el efluente final (arriba) y concentración de sólidos suspendidos totales y volátiles en la zona de regeneración y nitrificación (abajo)

Una vez que el modelo biológico ha sido calibrado, es de esperar que el simulador de operación prediga razonablemente la tasa dinámica de la respiración de la biomasa. De esta forma, el modelo del sistema de aireación puede ser ahora calibrado. Uno de los parámetros más inciertos del submodelo de transferencia de oxígeno es el factor de corrección que supone el fango activado. Su valor fue estimado mediante el ajuste de la potencia activa absorbida por las soplanges (P) obtenida por simulación (Figura 5, arriba, línea negra) con la medida en planta (línea gris). Los valores calibrados fueron 0.8 para los reactores de nitrificación y 0.6 para los de regeneración por su mayor concentración de sólidos suspendidos. No se llevaron a cabo variaciones dinámicas de este coeficiente debido a que la planta operó con elevadas edades celulares del fango. Los valores calibrados son coherentes además con una extensa zona de desnitrificación (Stenstrom and Rosso 2008). La Figura 5 (centro) muestra la comparación entre el caudal de aire (Q) simulado (en línea negra) en el último reactor de nitrificación con el medido en planta (en

línea gris). El grado de apertura (V) simulada de su válvula de aire (en línea negra) es similar a la medida (en línea gris, Figura 5, abajo).

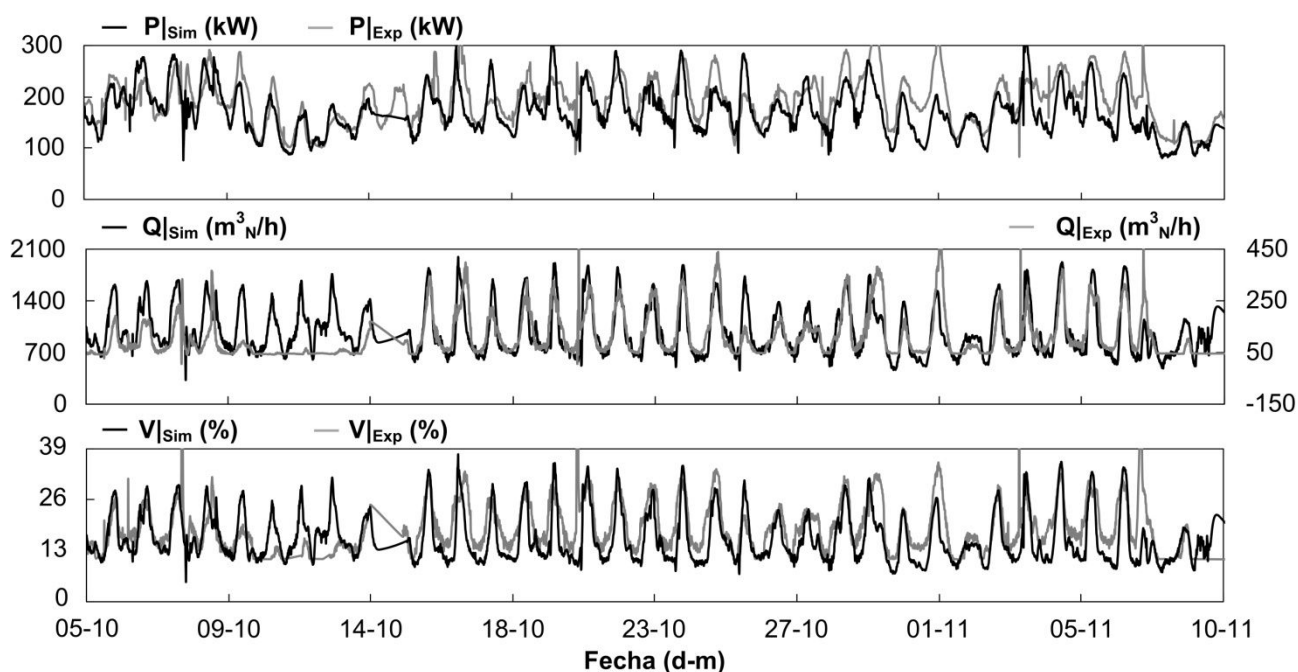


Figura 5 Potencia eléctrica activa consumida por las soplantes (arriba) y caudal de aire suministrado (centro) y grado de apertura de la válvula de aire del último reactor de nitrificación (abajo), para un mes de operación

La validación del modelo matemático de la EDAR de Galindo permite garantizar su utilidad para explorar con rigor una amplia variedad de escenarios de trabajo. De este modo, se puede ahora llevar a cabo un estudio sistemático y exhaustivo de simulación que obtenga nuevas estrategias de operación y control que optimicen la planta en cuanto a calidad del efluente vertido y eficiencia energética. Se detalla a continuación un análisis de los principales resultados.

PRINCIPALES RESULTADOS

La variación automática de la consigna de oxígeno disuelto utilizada para alcanzar la concentración media diaria deseada de nitrógeno amoniacal al final de la zona aireada supone un ahorro económico de entre el 13 % y el 16 % con la carga de entrada y condiciones actuales, tal y como se observó experimentalmente (Ayasa *et al.* 2006). No obstante, desde entonces no se han propuesto nuevas estrategias que puedan optimizar el tratamiento secundario de la planta. El modelo matemático calibrado de la planta se emplea ahora para proponer nuevas estrategias de operación y control. De entre las diferentes exploraciones destacan los siguientes ejemplos interesantes:

- Si se aumenta la consigna de nitrógeno amoniacal desde el valor actual de 1.0 g N/m^3 a 2.0 g N/m^3 , se conseguiría un ahorro energético de entre el 3.8 % y el 5.8 %. Con la tarifa eléctrica actual, el ahorro económico simulado se situaría entre 32.7 k€ y 50.0 k€ al año.
- Durante los períodos de mantenimiento, el controlador de nitrógeno amoniacal es desactivado y la consigna de oxígeno disuelto es situada en su valor de diseño ($2.0 \text{ g O}_2/\text{m}^3$). Las simulaciones permiten cuantificar el efecto que la reducción manual de esta consigna produce en los costes energéticos y la calidad efluente. Así mismo, el simulador permite conocer el valor óptimo de la concentración de oxígeno disuelto que minimiza el

consumo energético para unos requerimientos dados de calidad del efluente. A modo de ejemplo, la Figura 6 muestra el valor más apropiado de oxígeno disuelto a seleccionar en función de la temperatura y el nivel de sólidos suspendidos en los reactores. Es importante considerar aquí que esta figura es específica para la EDAR de Galindo y para unas condiciones determinadas de operación. Obviamente, un control automático de la consigna de oxígeno disuelto conseguiría adaptar más convenientemente la consigna de oxígeno en función de las condiciones dinámicas de operación.

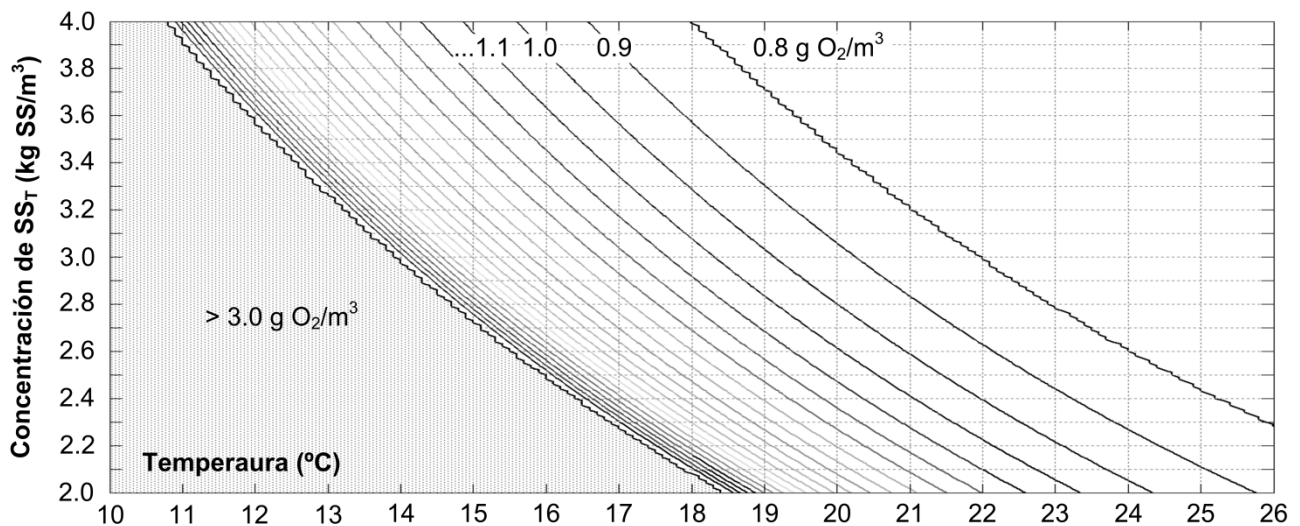


Figura 6 Ejemplo de la consigna de oxígeno disuelto a seleccionar en la zona de nitrificación durante los períodos de mantenimiento (para carga media y 1.0 g N/m^3 de nitrógeno amoniacal en el efluente)

- Cada una de las líneas puede operar en diferentes configuraciones hidráulicas. Por ejemplo, para minimizar la proliferación de bacterias filamentosas se opera actualmente en la configuración RDN. No obstante, el simulador de operación ha permitido conocer que la configuración DRDN (en la que se elimina la aireación forzada del primer reactor de regeneración) y un fraccionamiento nulo del caudal de entrada supondrían un ahorro adicional de entre el 3 % y el 5 %, correspondiente a 25.8 k€ y 43.0 k€ al año.
- La consigna de oxígeno disuelto de los reactores de regeneración se regula actualmente por el controlador avanzado de nitrógeno amoniacal. No obstante, se puede desacoplar su control automático debido a que la respiración bacteriana en esta zona es prácticamente endógena. De esta forma, mantener una concentración constante de oxígeno disuelto en la zona de regeneración supondría un ahorro máximo del 2 % (17.2 k€ al año).
- La incorporación de una estrategia que regulara de forma automática la presión de impulsión de las soplantes para mantener las válvulas de aire lo más abiertas posible (y así minimizar la pérdida de presión en el sistema de distribución de aire) conseguiría reducir el consumo energético un 4.5 % sin modificar la calidad del efluente (38.8 k€ al año). A modo de ejemplo, la Figura 7 muestra los resultados comparativos de la estrategia propuesta (línea color negro) respecto a la estrategia actual (línea color gris) para la presión de impulsión de las soplantes (gráfica inferior) y el grado de apertura de aire del primer reactor de nitrificación (gráfica superior). En la estrategia propuesta se ha seleccionado como consigna una apertura de válvula del 85 % para el control de la presión.

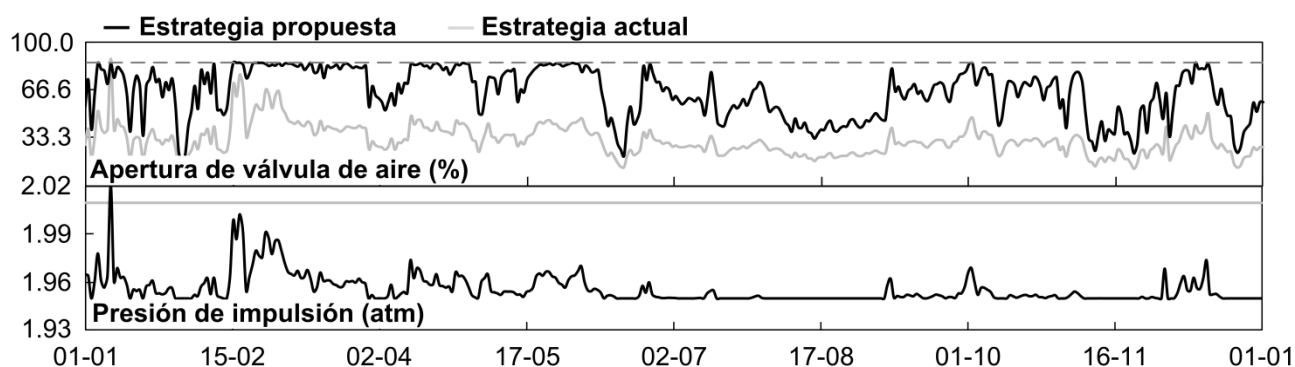


Figura 7 Resultados comparativos entre la estrategia actual y la estrategia propuesta para la presión de impulsión de las soplantes

El ahorro energético esperado (puntos 1, 3 y 5) asciende a entre el 11.3 % y el 15.3 % (97.3 k€ - 131.8 k€ al año) sin costes adicionales significativos. Los cambios propuestos en las estrategias de operación de la planta están siendo evaluados actualmente por los encargados de la explotación de la planta para ser implementados en un futuro cercano.

CONCLUSIÓN

Este texto presenta un simulador de operación especialmente diseñado para la EDAR de Galindo que ha permitido cuantificar de una manera precisa el ahorro energético y la calidad del efluente para diferentes estrategias de operación y control, facilitando así la optimización de la explotación de la planta.

El simulador se basa en un modelo matemático que ha sido validado experimentalmente en la propia planta y demuestra su potencial para estimar dinámicamente la calidad del efluente, los requerimientos de oxígeno, los caudales de aire, las pérdidas de presión en el sistema de distribución de aire, el consumo energético de las soplantes y bombas y los costes económicos asociados. Como resultado, un ahorro económico medio del 13.3 % (115 k€/año) ha sido estimado mediante la optimización de la operación y el control de la planta y sin costes adicionales significativos.

REFERENCIAS

- Ayesa, E.; de la Sota, A.; Grau, P.; Sagarna, J.M.; Salterain, A. & Suescun, J. (2006) Supervisory control strategies for the new WWTP of Galindo-Bilbao: The long run from the conceptual design to the full-scale experimental validation. *Water Science & Technology* 53(4-5), 193-201.
- Beltrán, S.; Irizar, I.; de la Sota, A., Villanueva, J.M. & Ayesa, E. (En revisión) Model-based optimization of aeration systems in WWTPs. *Water Science & Technology*.
- BOE (2007) Orden ITC/2794/2007, de 27 septiembre, por la que se revisan las tarifas eléctricas a partir del 1 de octubre de 2007. Boletín Oficial del Estado 234 (29/9/2007), 39690-39698.
- EUROSTAT (2012). Electricity - industrial consumers - half-yearly prices. epp.eurostat.ec.europa.eu/portal/page/portal/statistics/themes (accedido el día 15/03 2013).

Euskalmet (Agencia Vasca de la Meteorología) (2012) Red de estaciones meteorológicas del País Vasco. Gobierno Vasco, España.

Galarza, A., Ayesa, E., Linaza, M.T., Rivas, A. & Salterain, A. (2001) Application of mathematical tools to improve the design and operation of activated sludge plants. Case study: The new WWTP of Galindo-Bilbao. Part II: Operational strategies and automatic controllers. *Water Science & Technology* 43(7), 167-174.

Grau P.; Sagarna, J.M.; Suescun, J. & Ayesa, E. (2004) Full-scale experimental validation of new automatic control strategies for the optimum operation of WWTP with nitrogen removal. IWA 4th World Water Congress & Exhibitions, Morocco, September 19-24.

Hauduc, H.; Rieger, L.; Takács, I.; Héduit, A; Vanrolleghem P.A. & Gillot, S. (2010) A systematic approach for model verification: application on seven published activated sludge models. *Water Science & Technology* 61(4), 825-839.

Henze, M.; Gujer, W.; Mino, T. & van Loosdrecht, M.C.M. (2000) Activated Sludge Models: ASM1, ASM2, ASM2d and ASM3. Scientific and Technical Report No. 9, IWA Publishing, London.

Melcer, H.; Dold, P.L.; Jones, R.M.; Bye, C.M.; Takács, I.; Stensel, H.D.; Wilson, A.W.; Sun, P. & Bury, S. (2003) Methods of wastewater characterization in activated sludge modeling. Water Environment Research Foundation, USA.

OPTI (Observatorio de Prospectiva Tecnológica Industrial) (2010) Estudio de prospectiva. Consumo energético en el sector del agua. Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía (IDAE), España.

Rivas, A., Ayesa, E., Galarza, A. & Salterain A. (2001) Application of mathematical tools to improve the design and operation of activated sludge plants. Case study: The new WWTP of Galindo-Bilbao. Part I: Optimum design. *Water Science & Technology* 43(7), 157-165.

Stenstrom, M.K. & Rosso, D. (2008) Aeration and mixing. En: Biological wastewater treatment. Principles, modelling and design, IWA Publishing, London, UK, 245-272.

Suescun, J.; Ostolaza, X.; García-Sanz, M. & Ayesa, E. (2000) Real-time control strategies for predenitrification nitrification activated sludge plants biodegradation control. *Water Science & Technology* 43(1), 209-216.

CONTACTO

Alejandro de la Sota Zubillaga
Consorcio de Aguas Bilbao Bizkaia (CABB)
EDAR de Galindo, Calle Maesu Jose s/n, 48910 Sestao, Bizkaia
Teléfono: +34 94 487 31 00
Fax: +34 94 487 31 20
adlsota@consorciodeaguas.com