

¿Necesita España un nuevo modelo de gestión del agua?

La empresa consultora PwC, a petición de Acciona, ha elaborado el informe 'La gestión del agua en España, análisis de la situación actual del sector y retos futuros'. En él desarrolla una reflexión estratégica y regulatoria sobre nuestro sector en la que se autpregunta ¿por qué es necesario llevar a cabo una reforma profunda del actual modelo de gestión del agua en España? ¿cuál sería el modelo óptimo de gestión del agua en España? y ¿qué beneficios económicos generaría el desarrollo del nuevo modelo?

A la primera pregunta responde que el nuevo paradigma refleja que la escasez del agua se convertirá en un problema a nivel global, lo que obliga a tener en cuenta las tres dimensiones del agua: un bien público, un bien económico y un bien medioambiental. Ante este panorama, el sector debe implicarse. Y propone dos vías: mediante nuevos modelos de colaboración público privada; y a través de reformas mediante adaptaciones del marco regulatorio. Para la segunda pregunta propone: crear una metodología nacional para el cálculo de las tarifas del agua, la asignación de competencias regulatorias a alguna estructura pública, incentivos económicos para la aplicación efectiva de la metodología, una nueva definición de las competencias municipales en agua, el establecimiento del principio de separación de actividades y el incremento de las competencias de las comisiones de precios.

En términos económicos, la reforma estructural del modelo de gestión del agua traería consigo una serie de beneficios. Para empezar, el desarrollo de un marco regulatorio estable y predecible atraería inversión de operadores especializados, dinamizando la economía y generando empleo. Así mismo, se fomentaría la internacionalización de las empresas españolas en un sector en el que ya cuentan con sólidas credenciales, y se garantizaría el cumplimiento de la legislación comunitaria en materia de agua (especialmente la asociada con el saneamiento y la depuración, que requieren de fuertes inversiones), evitando así posibles sanciones. Desde PwC se ha realizado una estimación del potencial impacto macroeconómico de una reforma estructural del sector, y el resultado es que el nuevo modelo de gestión del agua podría generar un incremento de las inversiones de 15.700 millones de euros en el período 2013-2021, traduciéndose en un impacto agregado en el PIB de 12.600 millones de euros y en la creación de 23.700 nuevos empleos.

El objetivo fundamental del trabajo es impulsar el necesario debate social y político en nuestro país que permita sentar las bases para una mejora en la gestión del ciclo integral del agua y dinamice la inversión en el sector. Es más, el debate ya está lanzado tanto a la administración como al resto de agentes del sector (puede consultar el informe completo en www.tecnoaqua.es). ¿Usted qué opina?

TECNOAQUA

INFOEDITA COMUNICACIÓN PROFESIONAL S.L.

Editora

Mar Cañas Asanza • m.asanza@infoedita.es

Coordinador Editorial

Rubén Vinagre García • rubenvinagre@gmail.com

Redacción

María J. Gómez Carrillo • mj.gomez@infoedita.es

Máximo Álvarez • m.alvarez@infoedita.es

Alberto Adeva • a.adeva@infoedita.es

Publicidad

Enrique Huerta • e.huerta@infoedita.es

Delegado Publicidad - Zona Norte

David Echevarría • d.echevarria@b2bcomunicacion.es

Producción

Luis Quecedo • l.quecedo@infoedita.es

Departamento de Suscripciones

suscripciones@infoedita.es. Teléfono: 911 255 700

Dirección

Ribera de Axpe, 11, Edificio C-2

Planta 1ª, Oficina 113

48950 Erandio (VIZCAYA)

Rufino González, 40, 3ª dcha.

28037 MADRID

Teléfono: 911 255 700

ISSN: 2340-2091

Depósito Legal: BI-612-2013

Imprime: Ecolograf

© INFOEDITA 2014. Queda prohibida la reproducción total o parcial de los artículos incluidos en esta publicación, su tratamiento informático y la transmisión por cualquier forma o medio, sin el previo permiso por escrito del titular del Copyright. Las colaboraciones son de exclusiva responsabilidad del autor.

Control de amonio en un reactor biológico tipo carrusel utilizando algoritmos matemáticos basados en lógica borrosa (sistema LOBO₂)

Juan Ignacio Briones jefe de Zona Explotaciones de Facsa

Malú Barrera jefa de Explotación de Facsa

Roberto Sanchis Llopis profesor del Área de Ingeniería de Sistemas y Automática de la Universitat Jaume I

Lledó Prades investigador contratado de la Universitat Jaume I

Ignacio Peñarrocha profesor del Área de Ingeniería de Sistemas y Automática de la Universitat Jaume I

José Antonio Basiero técnico de Explotaciones de la Entidad Pública de Saneamiento de Aguas Residuales (EPSAR)

Juan Luís Martínez gerente de la Entidad Pública de Saneamiento de Aguas Residuales (EPSAR)

En el presente trabajo se describe el sistema de control automático de amonio de un reactor biológico de una depuradora, desarrollado utilizando lógica borrosa. La variable crítica a controlar es la concentración de amonio a la salida, que se mide en continuo por medio de una sonda de electrodo de ión selectivo (ISE). Los ciclos de marcha y paro resultantes son el resultado de una estrategia de comparador con histéresis cuyos umbrales de conmutación dependen en cada momento de la tarifa horaria en vigor. Un sistema basado en la lógica borrosa se encarga de actualizar los parámetros para tratar de mantener el funcionamiento óptimo del proceso ante cambios en las condiciones de funcionamiento. El objetivo de dicho sistema borroso, bautizado como LOBO₂, es cumplir en todo momento con los límites de amonio en efluente, al mismo tiempo que se optimiza el número de conmutaciones del turbocompresor y se minimiza el consumo energético en los periodos tarifarios más caros. Durante los ciclos de marcha, el algoritmo ajusta en todo momento el caudal de aire soplado para situarse en la tasa óptima de oxidación de amonio, evitando aportar más oxígeno del que los microorganismos pueden consumir.

Palabras clave

Estación depuradora de aguas residuales (EDAR), lógica borrosa, LOBO₂, algoritmo, carrusel, turbocompresor, amonio, sonda ISE, amonio, nitrato, consumo energético.

Ammonium control in a carousel bioreactor using mathematical algorithms based on fuzzy logic (LOBO₂ system)

In this work, a control system for the aeration of a bioreactor is developed using fuzzy logic algorithms. The main variable to be controlled is the ammonium concentration at the reactor output, which is measured by means of an ammonium-nitrate ion selective probe. The resultant start and stop cycles are the result of a hysteresis comparator strategy in which the commutation thresholds depend on the current energy period. A system based on fuzzy logic updates the algorithm parameters on-line in order to get the optimal performance of the process as the operating conditions and influent load changes. The objective of this fuzzy algorithm, named as LOBO₂, is to comply at all times with the effluent ammonium limits, while optimizing the number of commutations of the turboblower and minimizing the energy consumption in the most expensive rate periods. During the aeration cycles, the algorithm adjusts the air flow blown to the bioreactor to get the optimum ammonium oxidation rate, providing just the amount of oxygen the microorganisms can consume.

Keywords

Waste water treatment plant (WWTP), fuzzy logic, LOBO₂, algorithm, carousel, turbo compressor, ammonium, ISE probe, energy consumption.



1. Introducción

Durante muchos años, las herramientas fundamentales de control en un proceso biológico han sido las sondas de oxígeno, y el valor de consigna de este ha sido la variable primaria de regulación. Es frecuente visitar instalaciones donde se trabaja con consignas de oxígeno muy superiores a 2 mg/l sin motivo aparente, y pocos técnicos sabrían responder a la pregunta de cuál sería la consigna de oxígeno mínima a la que podrían trabajar en su instalación sin perjudicar la eliminación de materia orgánica carbonosa y nitrógeno.

A raíz de la instalación en la EDAR de Segorbe (Castellón) en 2010 de una sonda ISE de amonio y nitrato, se constató que la evolución real del amonio en efluente a lo largo del día era muy distinta a la supuesta, existiendo momentos del día en que se superaban ligeramente los límites permitidos por la autorización de vertido, y otros en los que se aireaba el reactor a pesar de que el valor de amonio en efluente era prácticamente cero.

La medida inmediata tomada tras la instalación de la sonda ISE fue la optimización de los ciclos fijos de marcha y paro diarios de los turbo-compresores de la EDAR. Simultáneamente, y en colaboración con la Universitat Jaume I (UJI), se creó un grupo de trabajo para el desarrollo de un algoritmo avanzado de control del proceso biológico de la EDAR, basado en la información suministrada por la sonda ISE de ión selectivo y empleando herramientas de lógica borrosa.

En este sentido, el control basado en lógica difusa permite extraer conclusiones cuantitativas a partir de un conjunto de datos observados y de bases de conocimiento, operando con conceptos propios del razonamiento humano cualitativo.

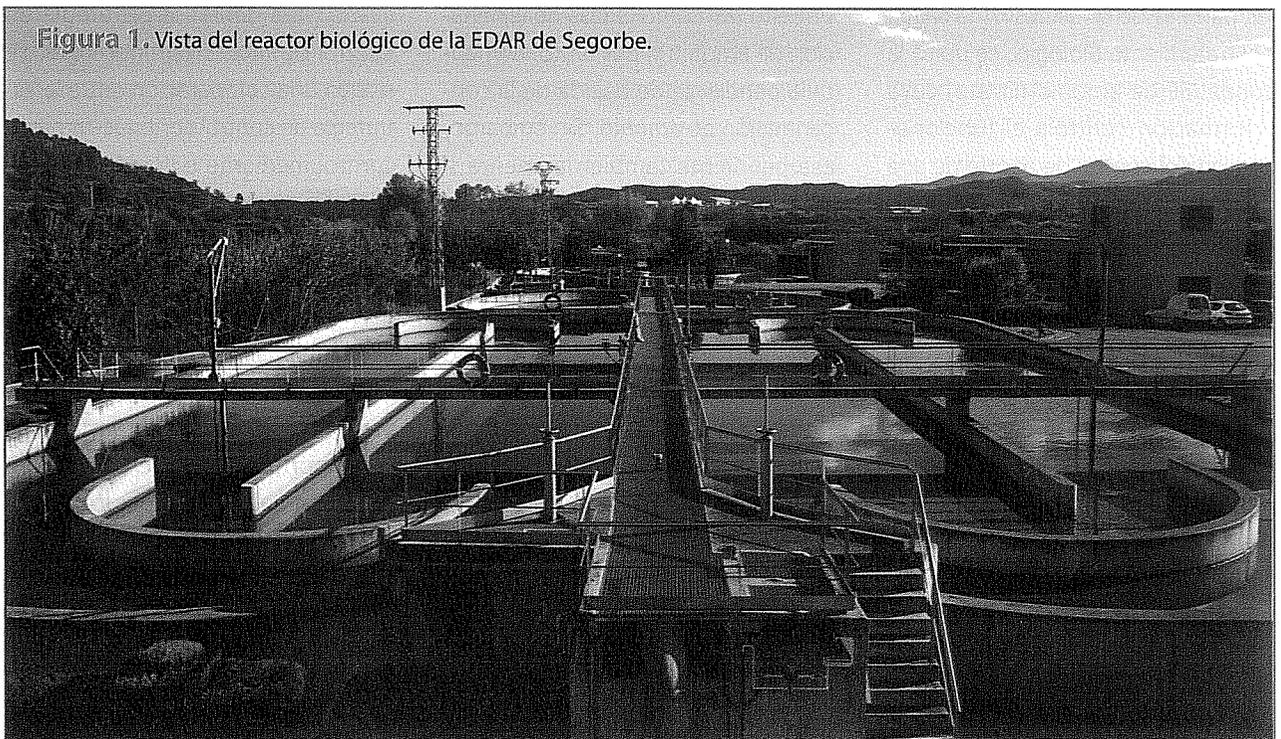
El desarrollo del algoritmo implicaba previamente la necesidad de modelizar el proceso. El inconveniente de usar modelos tipo ASM (Henze, 1987) es su gran complejidad, ya que se trata de un número elevado de ecuaciones diferenciales no lineales, con un gran número de parámetros

que deben ajustarse correctamente para que el modelo se adecue a un proceso concreto. Debido a esto, se optó por utilizar modelos más sencillos, lineales, con muy pocos parámetros, que se puedan identificar en línea fácilmente, y que sean adecuados para el propósito de controlar el amonio a la salida del proceso. El uso de modelos lineales ha sido reportado en algunas aplicaciones de control de estos procesos, así como en estudios teóricos (Stare, 2007; Evrim, 2009), aunque en ningún caso aplicado al problema de control que se aborda en el presente trabajo.

2. Descripción de la EDAR

El presente estudio se ha llevado a cabo en la EDAR de Segorbe (Castellón), cuya titularidad corresponde a la Entidad Pública de Saneamiento de Aguas Residuales (EPSAR). La planta tiene una capacidad de diseño de 5.800 m³/día, con una potencia instalada total de 448 kW. El caudal medio tratado es de 3.557 m³/día, dando servicio aproximadamente a 12.911 habitantes equivalentes.

Figura 1. Vista del reactor biológico de la EDAR de Segorbe.



El tratamiento biológico se compone de dos reactores tipo carrusel con un volumen unitario de 2.700 m³ (Figura 1). Cada carrusel dispone de un agitador de hélice de baja velocidad de 4,4 kW. Para el suministro de aire a los reactores se dispone de tres turbocompresores centrífugos, con una potencia unitaria de 90 kW y un caudal nominal de 2.900 m³/h. Un solo turbocompresor es capaz de cubrir las necesidades de aporte de aire de ambos reactores. Cada reactor dispone de dos parrillas de difusores de alta eficiencia, cada una de ellas compuesta por 261 unidades. La regulación del caudal de aire a difusores se realiza mediante el estrangulamiento de la válvula de admisión del turbocompresor, a diferencia de los compresores tipo Roots, donde la regulación se verifica mediante cambio en la velocidad de giro del eje libre.

En cuanto a la instrumentación existente, la EDAR de Segorbe dispone de dos sondas de oxígeno en cada reactor, así como un caudalímetro másico de efecto térmico que mide el caudal de aire inyectado a las parrillas de difusores. A la salida del tratamiento biológico se ubica la sonda ISE de amonio-nitrato, cuya información controla el funcionamiento del control de aporte de aire mediante lógica difusa. Se dispone también de amperímetros digitales en cada una de las turbosoplantes y una sonda pT-100 en el colector de salida que mide la temperatura del aire a las parrillas. Asimismo, la EDAR dispone de un caudalímetro electromagnético de agua tratada.

3. Modelado del proceso

Para la identificación del modelo del proceso, se utilizó un fichero muy completo con los datos registrados durante un mes de operación normal de la planta. El tratamiento ex-

haustivo de ese conjunto de datos ha permitido obtener los siguientes modelos:

- Un modelo dinámico sencillo que relaciona la apertura de válvula del turbocompresor, el flujo másico de amonio y el caudal a la entrada con la concentración de amonio a la salida.

- Un modelo estático que relaciona la potencia consumida por el turbocompresor con el oxígeno disuelto en régimen permanente.

- Un modelo numérico que permite estimar el coste energético adicional de cada arranque y parada del turbocompresor.

- Un modelo de predicción que permite predecir la evolución futura inmediata del flujo másico de amonio a la entrada.

La principal dificultad para obtener los modelos anteriores ha sido la ausencia de mediciones de la concentración de amonio a la entrada del proceso. Es evidente que si se aumenta la apertura de válvula, aumenta el caudal de aire y el oxígeno disuelto, así como la tasa de eliminación de amonio y, por tanto, aumenta la pendiente de bajada de la concentración de amonio. Sin embargo, esa pendiente también aumenta si disminuye el amonio a la entrada, por lo que, sin medir este, es muy difícil distinguir qué parte del cambio en el amonio de salida se debe al cambio en la válvula, y qué parte se debe al cambio del amonio de entrada. Para solventar esta dificultad, se ha sacado partido del funcionamiento del sistema en ciclos de marcha-paro de la aireación. Durante los ciclos de paro del turbocompresor no se elimina amonio. Eso permite estimar de forma bastante exacta el flujo másico de amonio a la entrada durante esos periodos a partir de la

concentración de amonio a la salida y más concretamente de su derivada. La ganancia del modelo no es constante, sino que varía a lo largo del día, ya que depende del amonio y de la materia orgánica carbonosa que se está eliminando.

Con respecto a la predicción de la evolución del flujo másico de amonio entrante, se ha planteado un modelo discreto, en el que el caudal y el flujo másico se entrada de amonio se modelan como funciones periódicas con periodo de un día mediante series de Fourier, mientras que la ganancia se modela como una función periódica diaria paramétrica, que aproxima una función constante a tramos horarios. Los parámetros de las tres funciones cambian lentamente con el tiempo, por lo que se tienen que actualizar en línea a partir de las mediciones. Respecto de la estimación del coste energético adicional de cada arranque y parada del turbocompresor, se ha estimado que es aproximadamente equivalente a unos 5 minutos de aireación improductiva.

Los modelos anteriores se han utilizado para definir la estrategia de control óptima. En primer lugar, se realizó una comparación entre la estrategia de control continuo frente al control mediante ciclos de marcha-paro. Con los modelos obtenidos del proceso se concluye que la estrategia de control continuo es mucho más ineficiente y por lo tanto implica un coste energético muy superior, a la estrategia de ciclos de marcha-paro. Esto se debe a que hay un *offset* importante en la relación entre la corriente del turbocompresor y el oxígeno disuelto, que hace que el rendimiento sea mucho menor (o el consumo energético mucho mayor) si el sistema está siempre en marcha con aperturas de válvula bajas. Por la misma razón, en la estrategia de

marcha-paro, el oxígeno disuelto en los periodos de marcha debe ser el más alto posible, siempre que no sea desaprovechado por los microorganismos, ya que así, el rendimiento del aire soplado es máximo, y la duración de los ciclos de marcha, mínima.

Los ciclos de marcha y paro se deben limitar en cierto sentido para garantizar el funcionamiento correcto de la planta. Por una parte, el ciclo de paro no debe sobrepasar un máximo, porque si se está demasiado tiempo sin airear (periodo nocturno con baja carga de entrada), la eliminación de materia orgánica carbonosa podría verse comprometida. Se estableció como valor límite superior a los ciclos de paro las 5 horas. De la misma forma, los ciclos de marcha deberían ser mayores que un mínimo, que se estableció en 30 minutos. Ambos parámetros son totalmente configurables.

En el funcionamiento por ciclos de marcha-paro aparece un compromiso entre el número de conmutaciones, el valor medio de amonio a la salida y el consumo energético. Cuanto mayor es el número de conmutaciones, más cerca está el valor medio de amonio a la salida del límite máximo, por lo que se elimina menos amonio en promedio, resultando en un coste energético menor. Sin embargo, el arranque en cada conmutación implica un consumo energético adicional improductivo, por lo que un número de conmutaciones excesivo resulta finalmente en un coste energético mayor. Así pues, habrá una situación óptima en la que el consumo energético sea mínimo. Esa situación óptima vendría definida por un valor determinado del umbral de conmutación inferior del amonio de salida (el umbral superior debería ser cercano al límite de vertido).

Para conseguir que el amonio baje hasta un valor prefijado justo a la hora de cambio de tarifa, se predice la evolución futura del amonio de salida a partir de la pendiente máxima de bajada del amonio, que se mide diariamente

Si el precio de la energía fuera constante a lo largo del día, bastaría utilizar como controlador un comparador con histéresis, con el umbral inferior óptimo. Sin embargo, la tarifa eléctrica está generalmente dividida en periodos valle, llano y punta, con precios muy distintos de la energía, lo cual introduce un factor muy importante a tener en cuenta para establecer una estrategia de conmutación óptima. Utilizando un algoritmo numérico de optimización mixta-entera con los modelos simulados, y teniendo en cuenta las restricciones anteriores, se llegó a la conclusión de que la estrategia óptima se puede aproximar definiendo unos umbrales inferiores de amonio distintos para cada tarifa horaria, y minimizando el tiempo de soplado en las tarifas más caras, lo cual equivale a forzar un nivel de amonio bajo al final de un periodo tarifario que precede a otro periodo más caro, y forzar un nivel de amonio alto al final de los periodos que preceden a periodos más baratos.

4. Algoritmo de control principal

La estructura de control propuesta, a la vista del análisis de la sección anterior, consta en su parte central de un comparador con histéresis, de tal forma que los niveles superior e inferior de dicho comparador cambian con el periodo tarifario. La salida de dicho comparador es la apertura de la válvula de admisión del turbocompresor, que regula el caudal

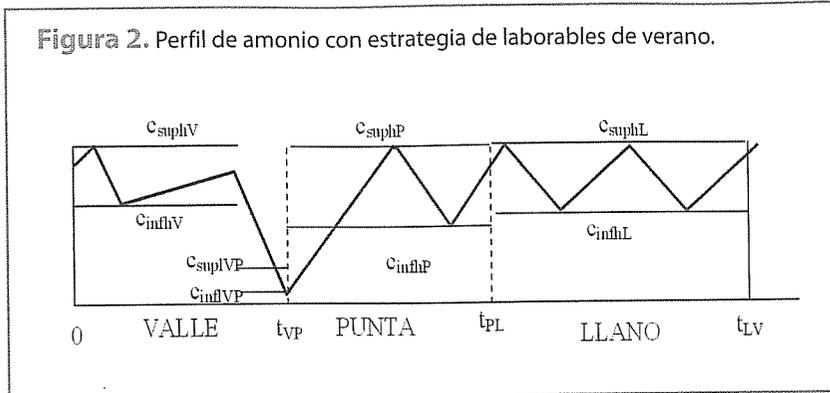
de aire. Dicha válvula se abrirá al máximo siempre que el aire soplado sea aprovechado por los microorganismos, ya que de esa forma la tasa de reducción de amonio es máxima, el tiempo de soplado mínimo y mínimo también el consumo energético. Sin embargo, cuando todo el aire soplado no sea aprovechado, el controlador reducirá de forma adecuada la apertura de la válvula. Cuando se aproxima un periodo tarifario más caro que el actual, se cambian los niveles del comparador a valores más bajos, para forzar a que baje el amonio. Esto reduce el consumo eléctrico en el periodo más caro, reduciendo el coste total. Para conseguir que el amonio baje hasta un valor prefijado justo a la hora de cambio de tarifa, se predice la evolución futura del amonio de salida a partir de la pendiente máxima de bajada del amonio, que se mide diariamente. De esta forma, se cambian los niveles del comparador cuando el cálculo de la predicción indica que el amonio estará en el nivel prefijado a la hora de cambio de tarifa. Por otra parte, cuando se aproxima a un cambio de tarifa hacia un periodo tarifario más barato, lo óptimo es que el amonio esté en valores elevados, cercanos al límite superior admisible. Esto se logrará ajustando adecuadamente los umbrales de cada periodo tarifario.

Para poder ajustar de forma automática los umbrales óptimos del comparador en cada periodo, se definen como parámetros ajustables

el número de periodos de marcha deseados en cada periodo tarifario. Teniendo esto en cuenta, se definen funciones borrosas que dan como salida pequeñas variaciones de los umbrales de cada periodo para tratar de aproximarse a un comportamiento óptimo (minimizando el tiempo de marcha en los periodos más caros). Además, se aplican las restricciones del tiempo máximo admisible con el turbocompresor parado y del tiempo mínimo requerido con el turbocompresor en marcha cada vez que se enciende. Estos dos valores son también parámetros configurables.

Cuando se pone en marcha el soplado, el controlador fija directamente la apertura de la válvula. La apertura de válvula fijada es la necesaria para que la pendiente de reducción de amonio sea máxima. Esto se debe a un efecto de saturación que se observa en la pendiente de eliminación de amonio. Cuando el amonio entrante es bajo, con una apertura de válvula intermedia se consigue la pendiente máxima de bajada del amonio, de forma que si se aumenta el soplado, esa pendiente ya no disminuye, por lo que se está desperdiciando aire. El algoritmo calcula en cada momento la apertura necesaria de la válvula de admisión para que la pendiente de oxidación de amonio sea máxima. La apertura de válvula resultante se limita entre los valores máximo del 100% y mínimo de 40%. El valor de la pendiente máxima varía lentamente a lo largo de los días, por lo que se obtiene mediante un filtro paso bajo a partir de la medición realizada cada día en la primera conmutación. Para ello, en ese periodo se sopla al máximo (válvula al 100%)

Así mismo, la ganancia del proceso no es tampoco constante, sino que cambia lentamente con el tiempo,



pero además cambia a lo largo del día, porque depende de otros factores, como la presencia de mayor o menor cantidad de materia orgánica carbonosa, por lo que se calcula mediante la función periódica descrita en la sección anterior, cuyos parámetros se actualizan en línea a través de una función borrosa.

Además, cuando los microorganismos están muy poco activos (debido a las bajas temperaturas o a otras causas), no son capaces de aprovechar todo el aire que se sopla para eliminar amonio, aunque el amonio entrante sea elevado. En ese caso, la concentración de oxígeno aumenta mucho (puede llegar a valores de hasta 7 mg/l). Para evitar que en esos casos se esté desperdiciando buena parte del aire soplado, se ha implementado un bucle de control de oxígeno disuelto, de forma que se reduzca la apertura de válvula si el oxígeno sube por encima de un valor de referencia, fijado en 4 mg/l. Cuando se pone en marcha el turbocompresor, se fija la apertura de válvula al valor límite máximo calculado. A partir de ese momento, cada minuto se recalcula la apertura de válvula según un algoritmo integrador, que reduce la apertura mientras el oxígeno esté por encima del límite superior.

El flujo másico de amonio estimado a la entrada también se calcula en línea mediante el modelo basado

en serie de Fourier ya descrito, que define una función periódica con periodo diario. Los parámetros de ese modelo se van actualizando continuamente (mediante un algoritmo recursivo de mínimos cuadrados) a partir de las mediciones del amonio de salida, y de la apertura de válvula aplicada. Además, es obvio que la conmutación de marcha a paro y viceversa no debe realizarse cuando la concentración de amonio alcance el valor deseado, sino con cierta antelación, debido al retardo, inercia y la dinámica del proceso. La anticipación, tanto del encendido requerido, como del paro del turbo, varía con el tiempo, por lo que se actualiza en línea en función de las desviaciones detectadas utilizando una función borrosa que tiene en cuenta la predicción de la carga influente.

A lo largo del año hay tres días tipo respecto a la tarifa eléctrica que aplica: verano, invierno y festivos. Para cada uno hay una distribución distinta de periodos tarifarios a lo largo del día (valle, llano y punta), lo que da lugar a un perfil de amonio óptimo distinto a lo largo del día. A continuación se detalla ese perfil para cada tarifa.

4.1. Estrategia de días laborables de verano

En este caso el día empieza con 8 horas de periodo valle, después hay 2 horas de llano, 6 horas de punta,



Figura 3. Perfil de amonio con estrategia de festivos.

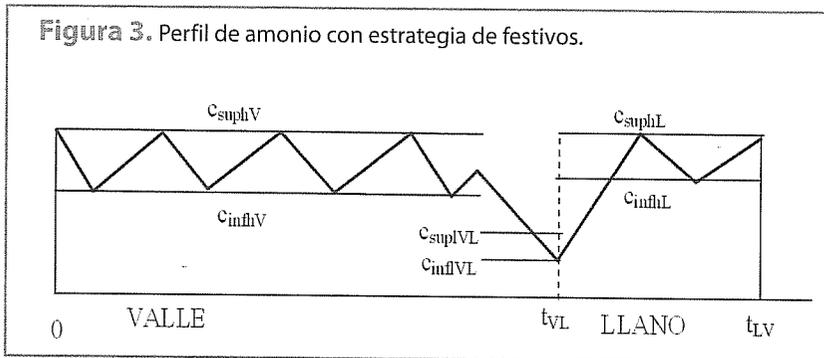
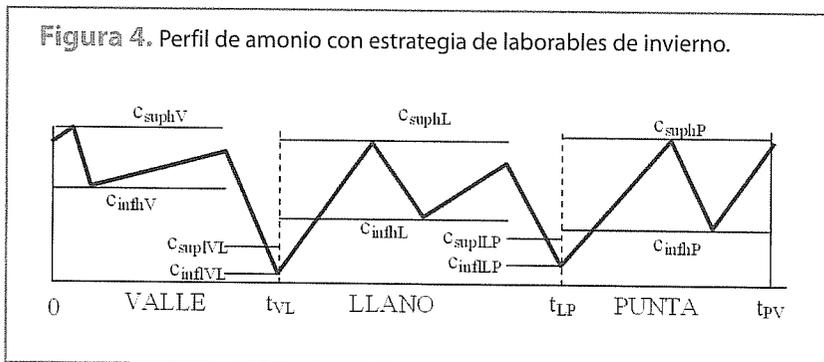


Figura 4. Perfil de amonio con estrategia de laborables de invierno.



y 8 horas de llano. Como la diferencia entre el precio de valle y llano es bastante mayor que entre llano y punta, para simplificar se supone que las 2 horas de llano intermedias son de punta. De esta forma, únicamente hay una transición de un periodo más barato a otro más caro, la producida a las 8 de la mañana. El perfil resultante de amonio sería como el de la **Figura 2**, donde se han incluido algunos de los parámetros configurables que definen el algoritmo de control.

La bajada antes del cambio de tarifa de valle a punta se consigue modificando los umbrales del comparador. El instante en que se hace esto no es constante, sino que depende de la evolución esperada del amonio a la salida: se cambia cuando se estima que, si se empieza a soplar en ese momento, a la hora del cambio de tarifa el amonio estará en el nivel CinfVP. Los valores de los parámetros se van ajustando continuamente por medio de unas funciones borrosas, cuyo objetivo general es conseguir

que en cada periodo tarifario haya el número de conmutaciones que se le han configurado, y que tanto en el periodo punta como en el llano, las conmutaciones sean lo más cortas que sea posible. En la **Figura 2** se muestran 2 conmutaciones en valle, 1 en punta y 2 en llano, aunque en la época de mayor entrada de amonio es necesario cambiar a 2 conmutaciones en punta.

4.2. Estrategia de días festivos

En días festivos solo hay 2 periodos tarifarios, valle de 18 horas y llano de 6 horas. Habrá, por tanto, un cambio de tarifa barata a tarifa cara. El perfil resultante de amonio podría ser como el de la **Figura 3**, donde se han incluido algunos de los parámetros configurables que definen el algoritmo de control.

Los parámetros que definen el algoritmo de control son los diversos umbrales que se observan en la gráfica, y el número de conmutaciones deseadas en cada periodo tarifario. En la **Figura 3** se muestran

2 conmutaciones en valle y 1 en llano. Los valores de los parámetros se van ajustando continuamente por medio de unas funciones borrosas, cuyo objetivo general es conseguir que en cada periodo haya el número de conmutaciones que se le han configurado: 4 en periodo valle y 1 en llano, y que en el periodo llano la conmutación sea lo más corta que sea posible.

4.3. Estrategia de días laborables de invierno

En el caso de la tarifa de invierno, se tienen 8 horas de valle, 9 horas de llano, 6 horas de punta y 1 hora de llano. Como la diferencia entre el precio de valle y llano es bastante mayor que entre llano y punta, para simplificar se supone que la hora de llano intermedia (de 23 a 24) es de punta. En este caso se tienen dos cambios de una tarifa más barata a otra más cara: el primero a las 8 de la mañana, y el segundo a las 17 horas. El perfil resultante de amonio podría ser como el de la **Figura 4**, donde se han incluido algunos de los parámetros configurables que definen el algoritmo de control.

Los valores de los parámetros se van ajustando continuamente por medio de unas funciones borrosas, cuyo objetivo general es conseguir que en cada periodo haya el número de conmutaciones que se le han configurado: 2 en periodo valle, 2 en llano y 1 en punta, y que tanto en el periodo punta como en el llano las conmutaciones sean lo más cortas que sea posible.

5. Sistema borroso de autoajuste y detección de fallos

El algoritmo de control descrito en la sección anterior tiene un gran número de parámetros que deben estar adecuadamente ajustados para

Figura 5. Evolución de variables de proceso con estrategia de invierno.

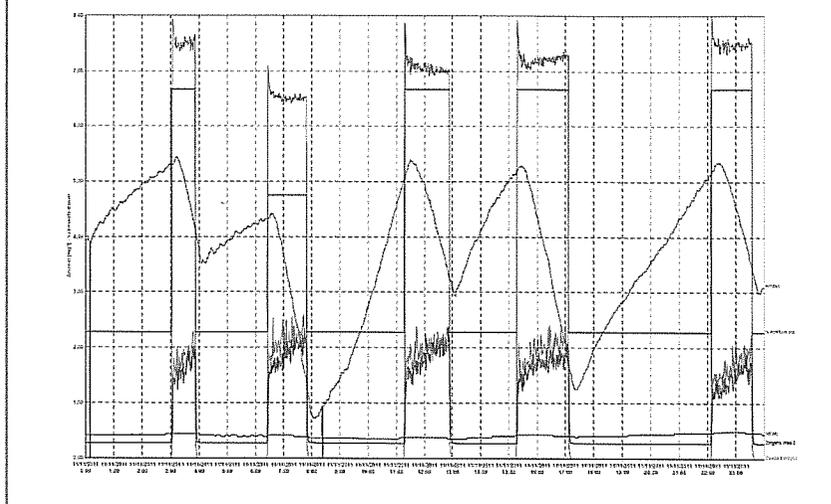
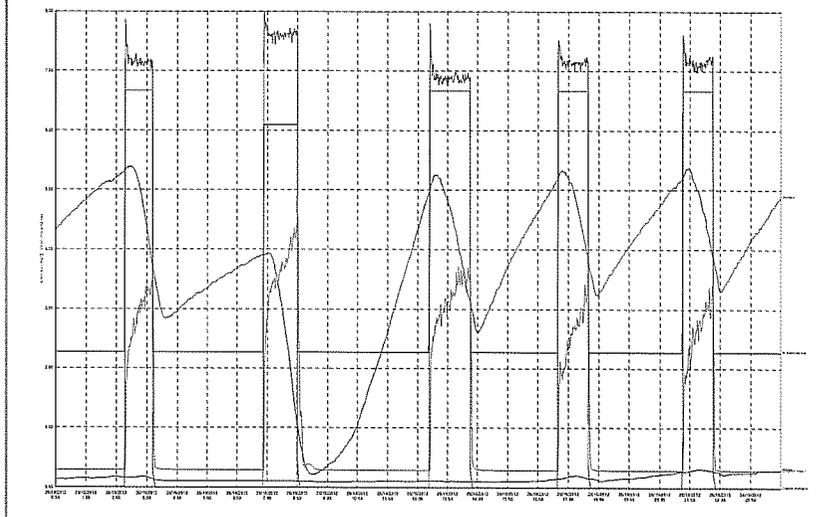


Figura 6. Evolución de variables de proceso con estrategia de verano.



que el comportamiento sea cercano al óptimo, es decir, para que el coste energético sea mínimo. Además, el comportamiento de la planta y las características del influente varían con el tiempo a lo largo del año. Debido a esto, se requiere implementar un sistema de actualización continua de esos parámetros, que permita al algoritmo adaptarse a esos cambios. La variabilidad del proceso y la complejidad del mismo, unidos al conocimiento de ciertas reglas heurísticas aproximadas sobre cómo modificar los parámetros para aproximarse a un funcionamiento óptimo, hacen

que la lógica borrosa sea una técnica adecuada para implementar el sistema de adaptación. Debido a la variabilidad del proceso se decidió ejecutar las funciones borrosas de ajuste una vez cada semana, utilizando como entrada los valores promediados de los indicadores.

Las funciones borrosas implementadas son las siguientes:

- Función borrosa para la actualización de los parámetros del controlador de la tarifa de verano. El objetivo de esta función es lograr que el número de conmutaciones de cada

periodo tarifario sea el preestablecido, y minimizar el tiempo de marcha en el periodo punta y llano.

- Función borrosa para la actualización de los parámetros del controlador de la tarifa de invierno. Se comporta de manera similar a la anterior.

- Función borrosa para la actualización de los parámetros del controlador de la tarifa de festivos. Se comporta de manera similar a la anterior.

- Funciones borrosas para el ajuste fino en el cambio de tarifa. El objetivo de estas funciones es conseguir que, en el instante de cambio de una tarifa más barata a otra más cara (de valle a punta, de valle a llano o de llano a punta), el amonio llegue al valor inferior del umbral previsto, sin adelantarse (lo cual podría producir una conmutación adicional y, por tanto, un consumo energético mayor) y sin retrasarse.

- Función borrosa para el ajuste de los parámetros relacionados con el retraso del proceso. Para calcular cuánta antelación se tiene que realizar la conmutación para tener en cuenta la dinámica y el retardo del proceso, se utilizan dos parámetros, uno para calcular la antelación en el apagado y otro para el encendido.

- Función borrosa para el ajuste de la ganancia. El objetivo es actualizar la ganancia para que el cálculo de la apertura de válvula necesaria para conseguir la pendiente máxima sea correcto. Por ejemplo, si la pendiente de bajada no es la máxima y la apertura de válvula aplicada no es la máxima, se reduce la ganancia para que la próxima vez la apertura sea mayor y la pendiente aumente.

- Función borrosa para la detección de fallo del sensor de amonio. Finalmente, se ha implementado también una función borrosa que determina la posible existencia o no de un fallo en el sensor, a partir de

la evolución de las mediciones (principalmente del amonio medido a la salida). Esta función se ejecuta cada minuto.

6. Resultados

El nuevo algoritmo de control mediante lógica borrosa (sistema LOBO₂) queda plenamente operativo en junio de 2011. Para ilustrar el funcionamiento del sistema, la **Figura 5** muestra la evolución de las distintas variables del proceso a lo largo de un día con tarifa de invierno. En marrón se muestra el amonio a la salida; en negro, la apertura de válvula; en rosa y azul oscuro, el oxígeno disuelto; en morado, el caudal de aire; y en azul claro, los nitratos de salida.

Se observa cómo hay dos conmutaciones en el periodo valle (de 0 a 8 h), dos en el periodo llano (de 8 a 17 h) y una en el periodo punta (de 17 a 24 h). Justo antes de que comience el periodo llano, el amonio alcanza su valor mínimo para minimizar el tiempo de soplado en llano. Justo antes del comienzo del periodo punta, el amonio también baja mucho para minimizar el tiempo de soplado en periodo punta. También se observa que la apertura de válvula es máxima en todos los periodos, salvo en el de final de la noche, en que la apertura se reduce porque se consigue la pendiente máxima de eliminación con menos aire, debido al poco amonio entrante en esas horas.

De manera análoga, se presentan a continuación las gráficas obtenidas correspondientes a un día tipo con estrategia de verano (**Figura 6**) y estrategia de festivo (**Figura 7**).

De cara a valorar los resultados obtenidos tras la implantación del sistema LOBO, es fundamental tener en cuenta los cambios en la estrategia de control introducidos en la EDAR en el periodo 2009-2011:

Figura 7. Evolución de variables de proceso con estrategia de festivo.

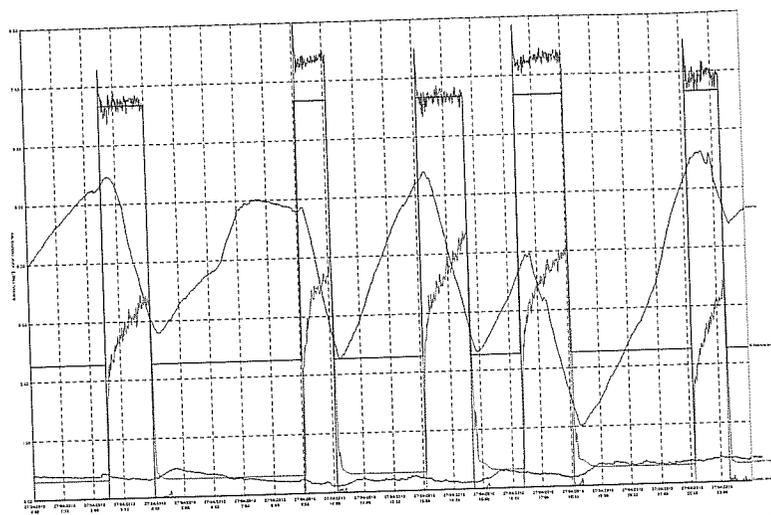


Tabla 1. Efecto del algoritmo de control por lógica difusa en eficiencia y coste.

Mes	Horas funcionamiento turbocompresor (horas/mes)	Energía total consumida (kWh/mes)	Coste energía total consumida (€/mes)	Promedio NH ₄ -N efluente (mg/l)
Junio'09	435	56.602	5.909	0,9
Junio'10	459	51.883	5.661	0,8
Junio'11	314	41.414	4.423	1,9
Junio'12	252	40.413	4.257	2,3

- Enero 2009-febrero 2010. Se trabaja en ciclos marcha paro fijos con consigna de oxígeno.

- Febrero 2010-mayo 2011. Se instala sonda ISE y se optimizan los ciclos de aireación.

- Junio 2011-actualidad. Se trabaja con el algoritmo LOBO₂ de control por lógica borrosa.

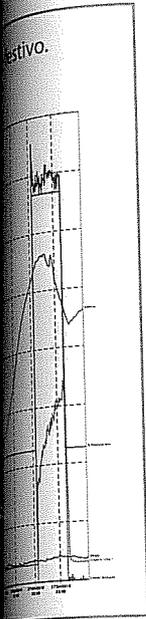
La **Tabla 1** compara los resultados obtenidos comparando el mes de julio en el periodo 2009-2011. Se usa el mes de julio debido a que es un mes muy estable, poco influenciado por lluvias y por los vertidos de las almazaras locales.

De los resultados anteriores se desprende que la implantación del sistema LOBO en la EDAR de Segorbe

ha supuesto una reducción de horas de funcionamiento de los turbocompresores del 45% respecto a 2010 (instalación sonda ISE), del 22% en consumo eléctrico y del 25% en coste eléctrico (considerando precios constantes). Estos buenos resultados van acompañados de unos valores de amonio en efluente muy consistentes que cumplen en todo momento los valores límites de autorización.

7. Conclusiones

En este trabajo se ha descrito un sistema de control de amonio de un reactor biológico tipo carrusel, bautizado por Facsa como sistema LOBO₂, y basado en la utilización de un sensor de amonio en línea. En primer lugar, se han obtenido diver-



eficiencia y coste.

Promedio
NH₄-N
efluente
(mg/l)

0,9

0,8

1,9

2,3

Los modelos que definen de forma aproximada el comportamiento del proceso. Posteriormente, se ha determinado la estrategia de control que minimiza el coste energético, que se basa en la utilización de ciclos de marcha y paro, y en la minimización del tiempo de marcha en los periodos tarifarios más caros, lo que se consigue bajando el amonio al nivel adecuado antes del cambio a una tarifa más cara, y dejando que suba al nivel adecuado antes del cambio a una tarifa más barata.

Para aproximarse a la estrategia óptima se ha implementado un algoritmo de control principal basado en el uso de un comparador con histéresis con umbrales variantes a lo largo del día. Dichos umbrales dependen del periodo tarifario, y de la predicción del amonio futuro realizada por un predictor cuyos parámetros se actua-

lizan en línea. Debido a la dinámica y al elevado retardo del proceso, la conmutación se realiza con una antelación a esos umbrales que depende del amonio estimado a la entrada (por el predictor anterior). Con objeto de no desperdiciar el aire soplado, la apertura de válvula fijada por la salida del comparador en los periodos de marcha no es constante, sino que depende del amonio estimado a la entrada a través de un modelo del proceso que tiene en cuenta la saturación de la tasa de eliminación de amonio. Además, un bucle de control de oxígeno reduce dicha apertura si el oxígeno disuelto supera un umbral superior. Este bucle de control solo entra en funcionamiento cuando la actividad de los microorganismos es especialmente baja (por ejemplo debido al frío).

Comparando los datos del mismo periodo de 2012 respecto a 2010, se

han reducido notablemente las horas de funcionamiento de los turbocompresores, consiguiéndose una reducción del consumo eléctrico del 22% y del coste eléctrico del 25%. Estos resultados se consideran muy satisfactorios, trabajándose en la actualidad en la adaptación del sistema LOBO₂ a instalaciones con compresores de desplazamiento positivo tipo Roots.

Bibliografía

- [1] Castell, D.; García, M.; Tormos, I.; Ferrer, C.; Morenilla, J.J.; Bernacer, I.; Basiero, A. (2003). Optimización energética del sistema de aireación de una EDAR. Análisis comparativo de dos tecnologías. Tecnología del Agua, núm. 327.
- [2] Henze, M.; Grady, C.P.L.Jr.; Gujer, W.; Marais, G.V.R.; Matsuo, T. (1987). Activated sludge model no. 1. IAWPRC Scientific and Technical Reports No. 1, Londres, Reino Unido.
- [3] Stare, A.; Vrecko, D.; Hvala, N.; Strmcnik, S. (2007). Comparison of control strategies for nitrogen removal in an activated sludge process in terms of operating costs.
- [4] Evrim, A.; Mehmet, Y.; Iiknur, A.; Ridvan, B. (2009). Comparison of control strategies for dissolved oxygen control in activated sludge wastewater treatment process computer aided. Chemical Engineering, vol. 26, págs. 1.197-1.201.



• Bombas, equipos y accesorios para limpieza de tuberías, alcantarillado e industrial con agua a alta presión