

Desarrollo de un sistema de control basado en lógica difusa para la aireación en un proceso de fangos activados

J. Manga*, J. Serralta**, A. Seco** y J. Ferrer***

Resumen

Se ha desarrollado un sistema de control basado en lógica difusa para la aireación. Este sistema permite controlar el oxígeno disuelto (OD) en un reactor de fangos activados y la presión a la salida del aireador. La principal ventaja del sistema de control consiste en que hace posible controlar el OD en varios reactores con un sólo conjunto de aireadores.

Este sistema de control ha sido evaluado mediante simulación de un proceso de fangos activados (reactor de mezcla completa). Se ha comparado el sistema de control basado en lógica difusa frente a un controlador todo/nada básico o de un nivel de aireación. Los resultados muestran que se logra un mejoramiento significativo en la estabilidad del sistema cuando se usa el sistema de control desarrollado en vez de un controlador todo/nada básico.

Palabras claves: Aireación, control de oxígeno disuelto, lógica difusa, proceso de fangos activados.

Abstract

An aeration fuzzy logic based control system has been developed. This system allows controlling the dissolved oxygen (DO) concentration in the aerobic reactors and the blowers discharge pressure. The main advantage of this control system is that it makes possible to control the DO in several reactors with only one set of blowers.

This aeration control system has been tested by simulation in activated sludge process. It has been compared with a one-aeration-level control system. Significant improvements in stability over the one-aeration level controller have been achieved.

Key words: Aeration, dissolved oxygen control, fuzzy logic, activated sludge process.

Fecha de recepción: 14 de febrero de 2001

INTRODUCCIÓN

Se considera que el parámetro de control más importante en un proceso de fangos activados (ASP) es la concentración de oxígeno disuelto (OD). Una concentración demasiado baja de OD inhibe el crecimiento de los microorganismos

* Grupo de Investigación en Tecnologías del Agua. División de Ingeniería, Universidad del Norte, Barranquilla (Colombia).
(e-mail: jmanga@uninorte.edu.co)

** Departamento de Ingeniería Química, Universitat de Valencia, Valencia (España).

*** Departamento de Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente, Universidad Politécnica de Valencia, Valencia (España).

(especialmente de las bacterias nitrificantes) y promueve la proliferación de bacterias filamentosas. Una concentración de OD demasiado alta requiere de un consumo de energía excesivo. Así mismo, recircular agua con una alta concentración de OD hace que el proceso de desnitrificación sea menos eficaz (Lindberg y Carlsson, 1996).

Por otra parte, el costo de la aireación representa cerca del 50% del consumo de energía en las plantas de tratamiento de aguas residuales. Por esto, un mejoramiento en el sistema de aireación producirá un importante ahorro energético.

Muchos de los problemas que se tienen en el control de OD aparecen cuando hay más de un reactor aireado que debe ser controlado en una planta de tratamiento. Los problemas se agudizan cuando el sistema de aireación para los diferentes reactores utiliza elementos comunes, tales como aireadores y tuberías de suministro de aire. Cuando se tiene un único conjunto de aireadores, se hace necesario la utilización de una válvula de control por cada reactor para lograr un buen control del OD. Sin embargo, la utilización de válvulas de control no es suficiente para lograr un buen control de OD, debido a que cuando se cierra una válvula de control sin modificar la velocidad rotacional de los aireadores se provoca una perturbación en el resto del sistema de aireación, lo cual incrementa la presión a la salida del aireador. El consumo de energía del aireador depende de la velocidad rota-

cional y de la presión a la salida. Por lo tanto, un incremento en la presión provoca un incremento en el consumo de energía. Usando aireadores de velocidad variable se obtienen ahorros significativos en el consumo energético.

Algunos sistemas para el control del oxígeno permiten controlar separadamente el OD en varios reactores (Nam *et al.*, 1996; Hewitt, 1996), sin embargo, no incluyen un sistema de control, por separado, de la presión a la salida del aireador. Debido a esto, el movimiento en las válvulas de control en uno de los reactores afecta al resto del sistema.

El aporte de este trabajo es el desarrollo de un sistema de control para la aireación que integra el control del OD en los reactores aireados y el control de la presión a la salida del aireador. Esto ayuda, por una parte, a la minimización del consumo energético, y por otra, a la optimización de los procesos biológicos mediante el control de la cantidad de aire que se abastece a los reactores aireados. Este sistema de control puede lograr una óptima aireación mediante el ajuste continuo de la abertura de las válvulas de control y de la velocidad rotacional de los aireadores.

SISTEMA DE CONTROL BASADO EN LÓGICA DIFUSA

Consideraciones generales acerca del sistema de control

Como se puede ver en la figura 1, el sistema de control para la aireación

desarrollado presenta dos componentes: el sistema de control supervisado y el sistema de control del OD y de la presión a la salida del aireador. En el sistema de control supervisado se establecen los valores de consigna tanto para el OD como para la presión. También se ha desarrollado un sistema experto, con el fin de prevenir que los aireadores estén continuamente conectándose y desconectándose. En el caso

de que existan más de un aireador, este sistema experto reparte el número total de vueltas al que deben estar girando los aireadores entre los distintos aireadores que se tengan.

Para conseguir mantener la concentración de OD en el valor de consigna (usualmente se utiliza como valor de consigna 2 mg/l), en un reactor de fangos activados aireado, se ha imple-

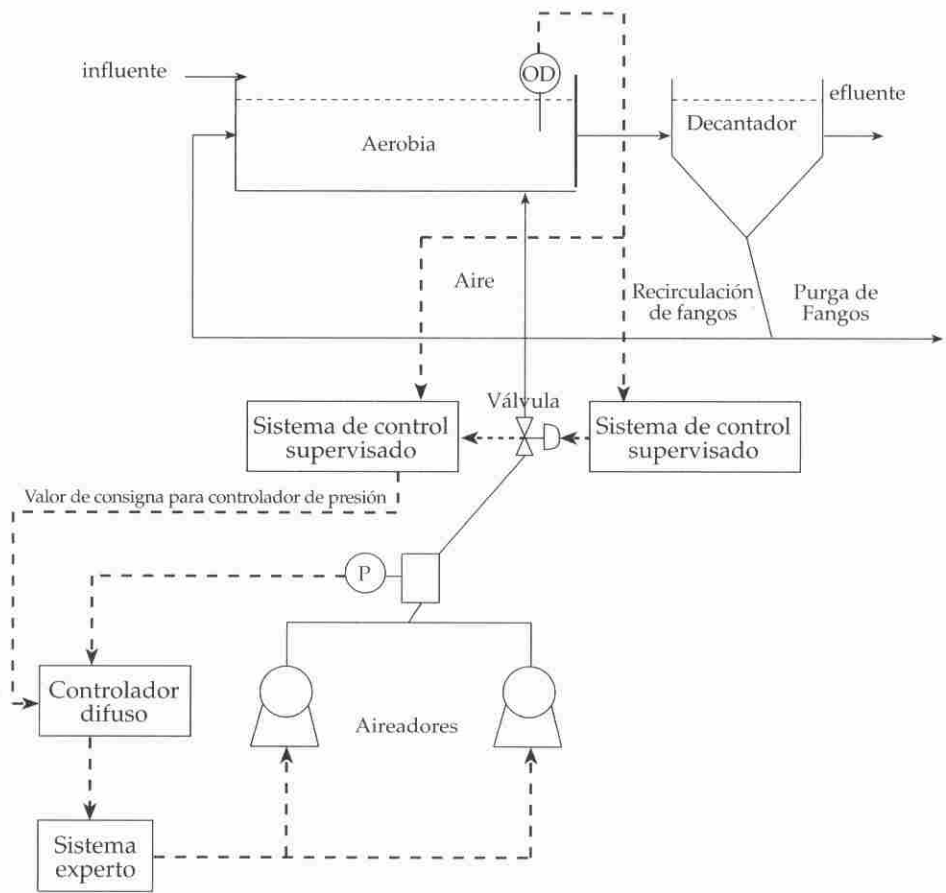


Figura 1. Esquema del sistema de control desarrollado aplicado a un proceso de fangos activados

mentado un controlador basado en la lógica difusa. Este controlador modifica el grado de apertura de la válvula en función del oxígeno disuelto.

Cuando el oxígeno es elevado la válvula se cerrará, pasará menos caudal y se producirá un incremento de la presión a la entrada de la válvula. Ese incremento en la presión puede provocar problemas de sobrepresiones y obligar al aireador a comprimir más el aire, lo que supone un consumo energético extra. Para mantener constante la presión antes de la válvula, se ha implementado otro controlador basado en la lógica difusa. Este segundo controlador modifica la velocidad de giro del aireador en función de la presión a la salida de éste.

La presión a la salida del aireador debe ser suficiente para que el aire salga por los difusores y no entre agua. El valor concreto dependerá del diseño del sistema. Será la suma de las pérdidas de presión que experimenta el aire al circular por la tubería, al atravesar la válvula y al pasar por los difusores, más la presión hidrostática y más la presión atmosférica. No es conveniente que ese valor sea muy elevado, porque cuanto más haya que comprimir el aire, mayor será el costo energético.

Durante períodos de altas cargas orgánicas en la entrada de agua, si la válvula está completamente abierta y no es suficiente para mantener la concentración de OD en el valor de consigna, el sistema de control supervisado

detecta la situación e incrementa el valor de consigna, para el controlador de la presión, proporcionalmente al error en el OD. Cuando la carga disminuye, la válvula se cierra, y el sistema de control supervisado retorna el valor de consigna al punto original. También, en períodos de baja carga orgánica, si la válvula está casi completamente cerrada, el sistema de control supervisado decrece el valor de consigna.

Es importante el hecho de que los dos controladores sean independientes. Esto permite airear y controlar varios reactores con un solo conjunto de aireadores. Cada reactor tiene su propio controlador del oxígeno que en función del OD en el reactor se modifica la apertura de la válvula. Además, el otro controlador modifica la velocidad de giro del aireador con objeto de mantener la presión constante. La función principal de separar el controlador de la presión del controlador de OD es la de prevenir que el movimiento de la válvula en un reactor altere el resto del sistema.

Descripción del sistema de control

Mientras que en la lógica booleana los límites de los conjuntos están perfectamente definidos y un elemento puede pertenecer (grado de pertenencia 1) o no pertenecer (grado de pertenencia 0) a un determinado conjunto, en la lógica difusa los conjuntos son «etiquetas lingüísticas» (Ej: grande negativo, pequeño negativo, pequeño positivo) que no tienen los límites bien definidos. La

pertenencia de un elemento a un conjunto varía de 0 a 1.

Para el controlador propuesto, las 5 etapas características están representadas en la figura 2.

Para el caso del controlador de la presión antes de la válvula, el esquema es análogo, y se diferencia únicamente en el número de variables de entrada y salida, como se describirá a continuación.

Medida de la variable física y entrada de datos al controlador

En el controlador del oxígeno, la variable física medida es la concentración de oxígeno disuelto y las variables de entrada al controlador son tres: el error (diferencia entre el oxígeno disuelto y el valor de consigna), la acumulación del error y la variación del error. En el controlador de la presión, la variable física medida es la presión a la salida del aireador y las variables de entrada

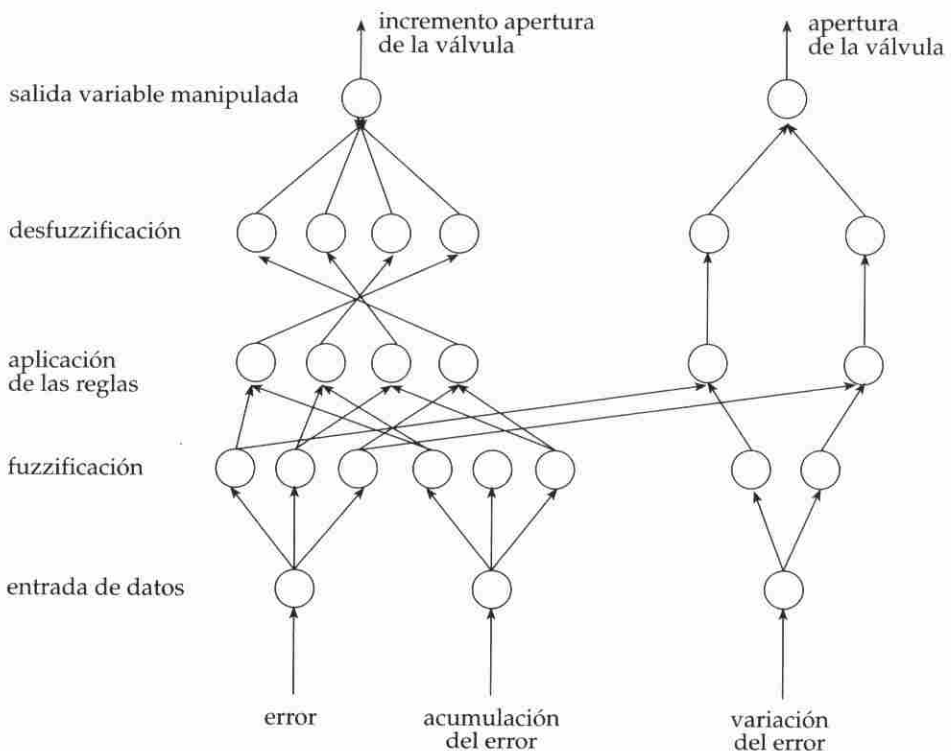


Figura 2. Etapas en el controlador basado en la lógica difusa para el oxígeno

al controlador son el error y la acumulación del error.

Conversión de los datos a variables difusas (fuzzificación)

A cada variable física se le han asignado una serie de «etiquetas lingüísticas». Las funciones de pertenencia obtenidas para la transformación de las variables de entrada en variables difusas se muestran en las siguientes figuras. En las figuras 3, 4 y 5 se muestran las funciones de pertenencia de las distintas variables del controlador del oxígeno. Igualmente, en las figuras 6 y 7 se muestran las funciones de pertenencia de las

distintas variables del controlador de la presión.

Las funciones de pertenencia de la variación del error en el controlador del oxígeno tienen esa forma porque la variación del error se utiliza para dotar al sistema de capacidad de respuesta ante variaciones bruscas en las condiciones de entrada del agua. Esas variaciones bruscas se detectan porque se producen variaciones importantes en la concentración de oxígeno disuelto. Para variaciones suaves basta con el error y la acumulación del error para controlar el oxígeno disuelto.

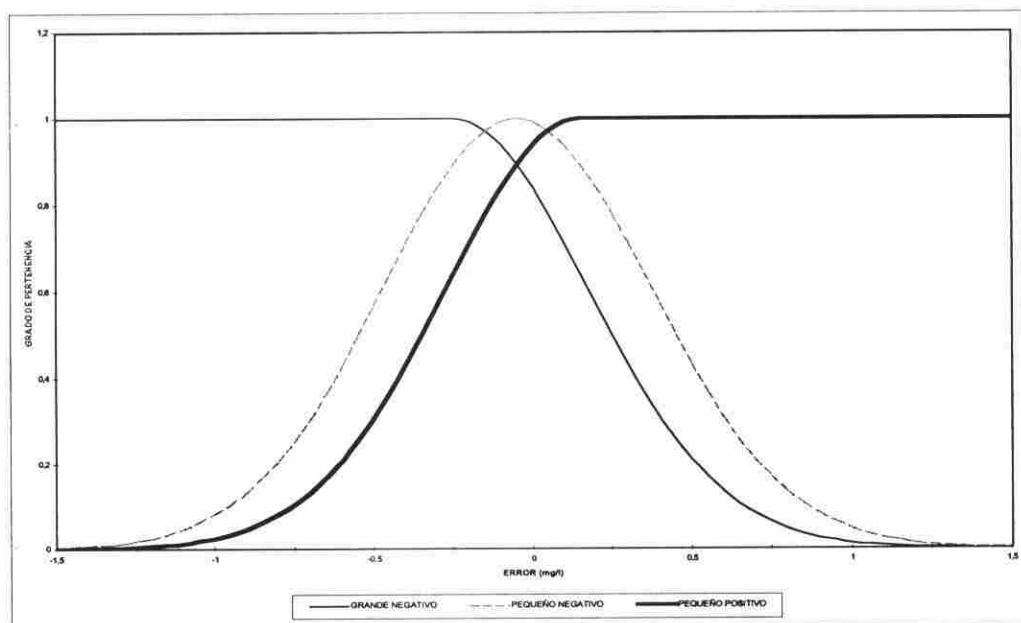


Figura 3. Funciones de pertenencia para el error en la medida del oxígeno

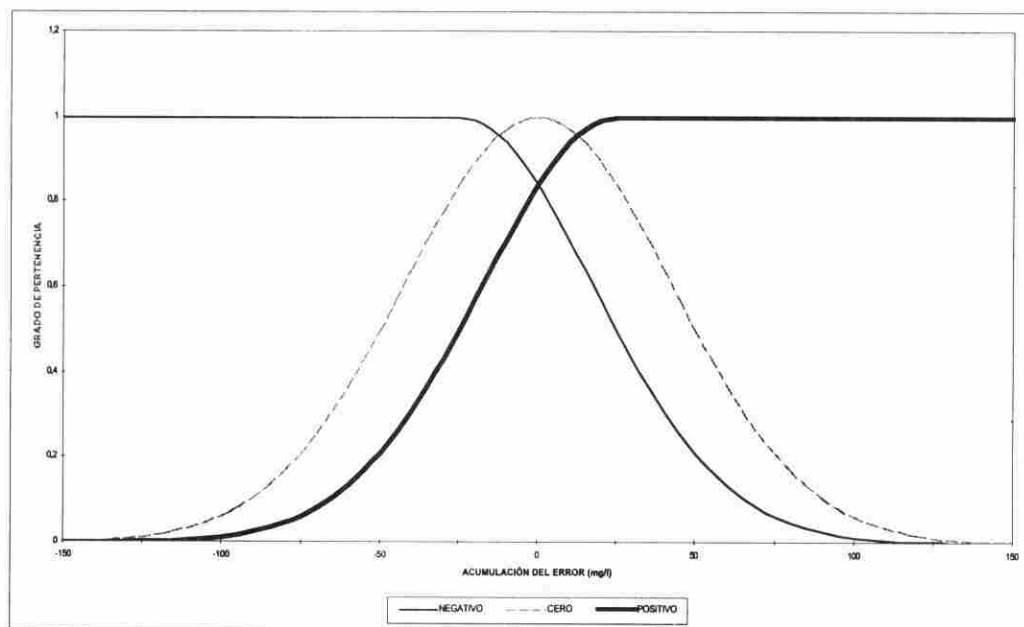


Figura 4. Funciones de pertenencia para la acumulación del error en la medida del oxígeno

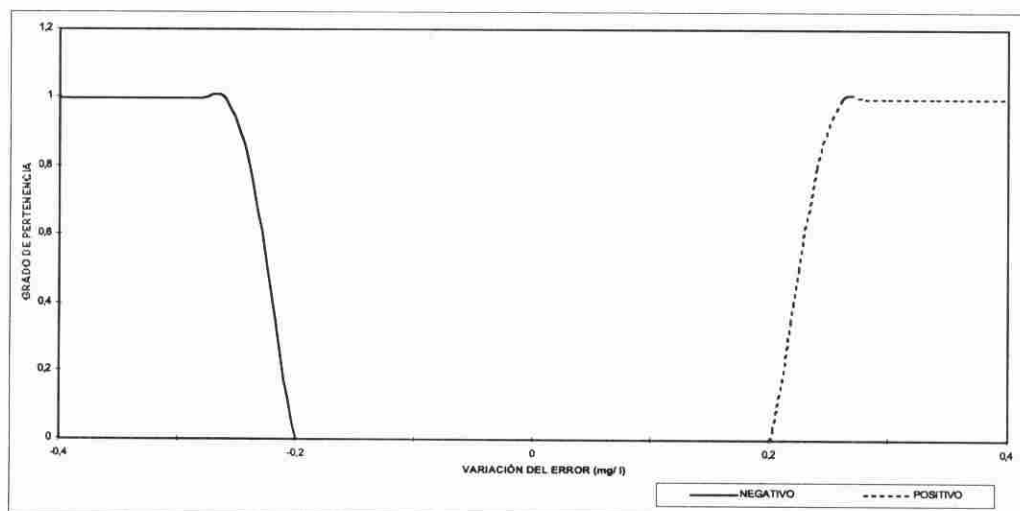


Figura 5. Funciones de pertenencia para la variación del error en la medida del oxígeno

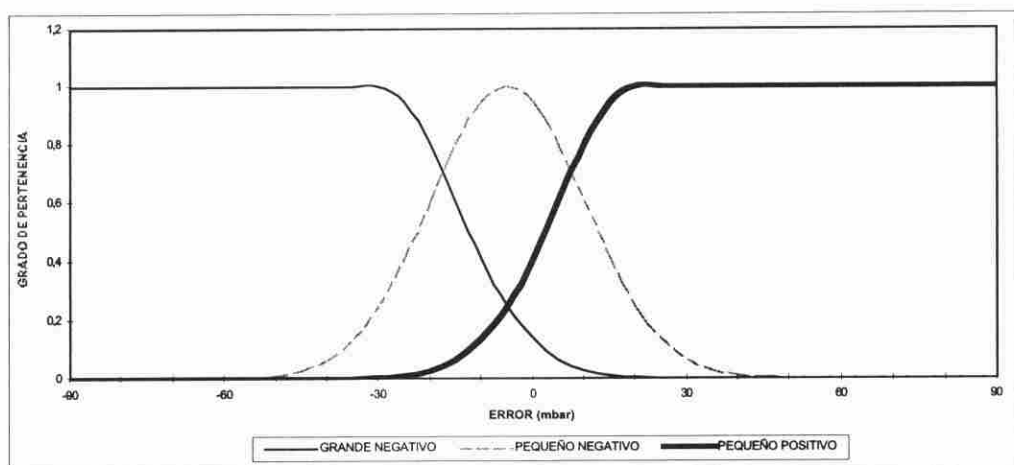


Figura 6. Funciones de pertenencia para el error en la medida de la presión

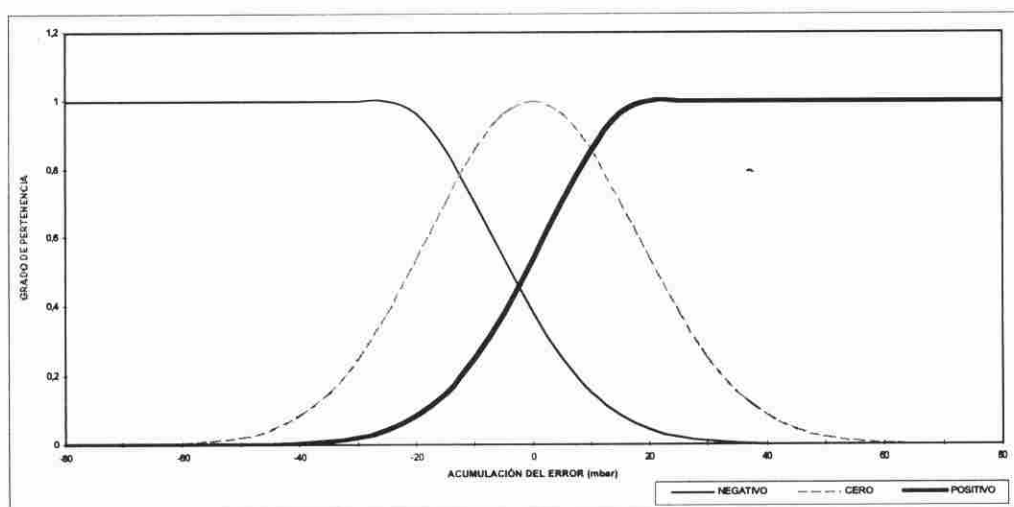


Figura 7. Funciones de pertenencia para la acumulación del error en la medida de la presión

Aplicación de las reglas

Se trata de un conjunto de reglas de la forma «si ... entonces ...» y son la base de

la acción de control. En algunas de estas reglas la premisa es doble, es decir, tienen la forma «si... y/o ... entonces ...». En estos casos se puede utilizar el ope-

rador «y» o el operador «o» según se quiera que se cumpla una o las dos premisas al mismo tiempo. En este trabajo se ha utilizado el operador «y» y se ha calculado el grado de aplicación de cada regla mediante la siguiente expresión:

$$\mu_R = \mu_{premisal} \cdot \mu_{premisal2}$$

Conversión de variables difusas en variables físicas (desfuzzificación)

Las funciones de pertenencia obtenidas para la transformación de las variables difusas en variables físicas (desfuzzificación) se muestran en las figuras 8 y 9 para el controlador del oxígeno.

Las curvas de la apertura de la válvula nos proporcionan un valor de ésta

muy útil para que el sistema responda rápidamente ante entradas en escalón.

En función de la densidad de difusores del reactor de fangos activados, las variaciones en la apertura de la válvula deberán ser más o menos bruscas. Cuanto mayor sea la densidad de difusores menores deberán ser las variaciones en la apertura de la válvula. Esto implica que las funciones de pertenencia variarán en función de la densidad de difusores.

Para que el sistema pueda reaccionar rápidamente ante una entrada en escalón son necesarias variaciones importantes en la apertura de la válvula. Estas variaciones bruscas se consiguen con un conjunto de reglas que teniendo en cuenta el error y la variación del

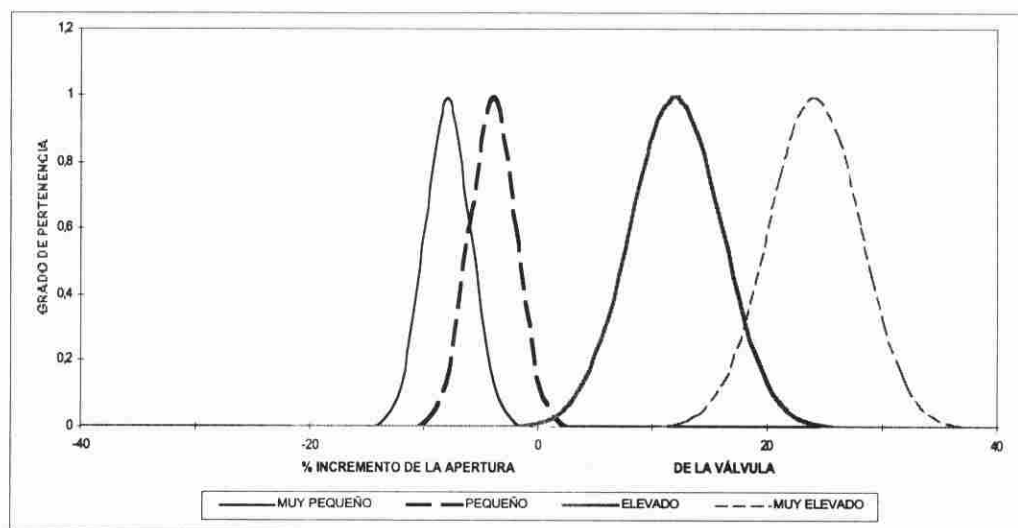


Figura 8. Funciones de pertenencia para el incremento de la apertura de la válvula

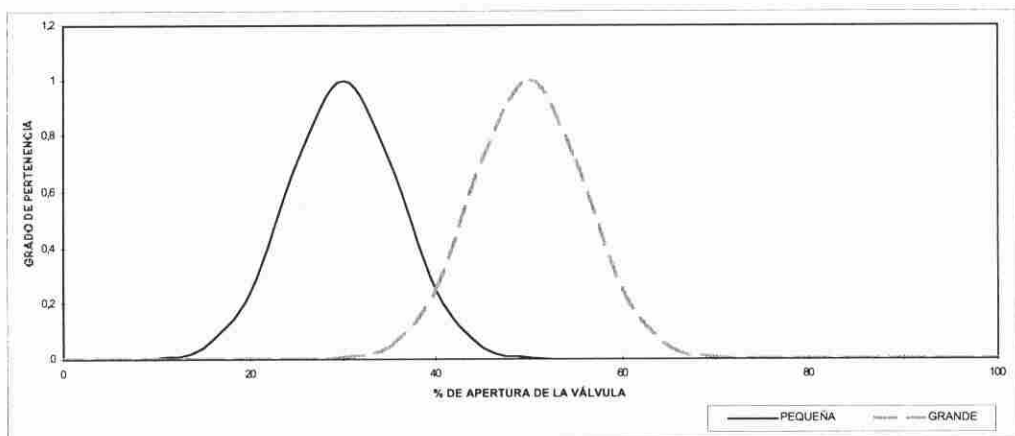


Figura 9. Funciones de pertenencia para la apertura de la válvula

error proporcionan un valor para la apertura de la válvula. Debido a que este valor provoca cierres bastante más bruscos que aperturas, las curvas del incremento de la apertura de la válvula son asimétricas. De esta forma se consiguen aperturas bastante importantes y cierres más moderados. Esto permite

obtener un buen control tanto ante una entrada sinusoidal como ante una entrada en escalón.

Las funciones de pertenencia para las variables de salida en el controlador de la presión se muestran en la figura 10.

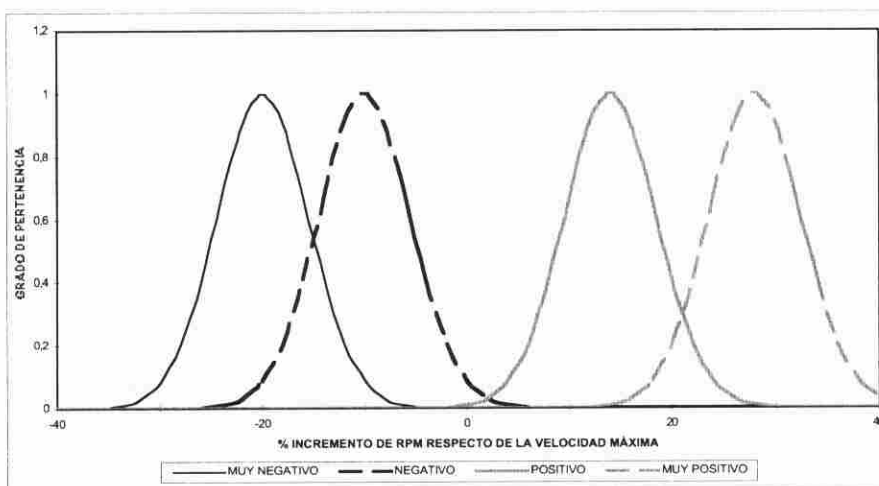


Figura 10. Funciones de pertenencia para el incremento de la velocidad de giro de los aireadores

Los aireadores deben compensar las variaciones de presión provocadas por las modificaciones de la apertura de la válvula. Por tanto, como las curvas de incremento de apertura de la válvula son asimétricas, también deben serlo las curvas del incremento de la velocidad de giro de los aireadores. De esta forma, los aireadores acompañarán a la válvula en sus aperturas bruscas.

Para la desfuzzificación se ha utilizado el método de los **valores medios**, por ser el más fácil de programar y el más adecuado para el control en tiempo real (Tsai *et al.*, 1994). La ecuación que utiliza este método es:

$$Y = \frac{\sum_{j=1}^c y_j \cdot \mu(y_j)}{\sum_{j=1}^c \mu(y_j)}$$

donde c es el número de etiquetas lingüísticas, y_j los valores medios de las funciones de pertenencia, y $\mu(y_j)$ los diferentes grados de pertenencia.

Salida de resultados

El controlador envía un valor de una variable física al elemento final de control. Las variables físicas, para el controlador de OD, son el incremento de la apertura de la válvula y la apertura de ésta. El sistema debe elegir cuál de las dos fijará la nueva apertura. El valor que proporciona el incremento de la apertura se utiliza en la mayoría de los casos, ya que está pensado para variaciones suaves de caudal. Por el contrario, el valor de la apertura de la válvula

proporciona al sistema una mayor capacidad de reacción ante una variación brusca de caudal y se utiliza sólo ante cambios bruscos en las condiciones de entrada que se traducen en cambios bruscos en la concentración de oxígeno disuelto. La variable física para el controlador de la presión es el incremento de la velocidad de giro del aireador.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Con el fin de evaluar el sistema de control propuesto, éste se ha implementado en un proceso de fangos activados (mezcla completa). La configuración del sistema de tratamiento utilizado en las simulaciones se muestra en la figura 1.

El reactor de fangos activados tiene un volumen de 5000 m³ y un calado de 5 m. El caudal de entrada a la planta supuesto es de 20000 m³/día. El agua a la entrada tiene una DQO de 800 mg/l constante. Se ha supuesto que en el efluente no salen microorganismos y que la concentración de ellos en las corrientes de purga y recirculación es de 4.000 mg/l.

Modelo biológico utilizado

Debido a la sencillez del modelo Monod-Herbert con función *switch* para el oxígeno, éste fue utilizado en la simulación para probar el funcionamiento del controlador difuso. Posteriormente, en otros trabajos se emplearán modelos más complejos, como el modelo de fangos activados N° 2 de la IWA (Henze *et al.*, 1995). En la tabla 1 se muestran, en

notación matricial, los procesos de transformación considerados, junto con los coeficientes estequiométricos y las velocidades cinéticas para cada uno de los procesos. Los valores de los parámetros estequiométricos y cinéticos utilizados en este trabajo son los siguientes:
 $Y_H = 0.63 \text{ gDQO/gDQO}$, $\mu_{m,H} = 6 \text{ día}^{-1}$,
 $K_{OH} = 0.2 \text{ DQO/m}^3$, $K_S = 4 \text{ gDQO/m}^3$ y
 $b_H = 0.4 \text{ día}^{-1}$.

En la figura 12 se observa que la respuesta del sistema es bastante mejor si se tiene en cuenta el valor que proporciona la apertura de la válvula. Este valor provoca una apertura más rápida, y con eso se consigue que la concentración de oxígeno disminuya menos. Utilizando sólo el valor que proporciona el incremento de apertura, la respuesta del sistema es más lenta.

Tabla 1
Modelo Monod-Herbert

Componente	1: S_0	2: S	3: X_H	Ecuación de velocidad de reacción p_i
Listado de procesos j				
1: Crecimiento aerobio	$-\frac{1}{Y_H} + 1$	$-\frac{1}{Y_H}$	+1	$\mu_{m,H} \cdot \frac{S}{K_S + S} \cdot \frac{S_0}{K_{OH} + S_0} X_H$
2: Lisis		+1	-1	$b_H \cdot X_H$
Velocidad de transformación observada r_i	$r_i = \sum_j v_{j,i} \cdot \rho_j$	$[M_j L^{-3} T^{-1}]$		
Definición de los parámetros estequiométricos: Y_H = Constante de producción máxima ($M_H M_S^{-1}$)	Oxígeno disuelto O_2 (DQO)	Sustrato orgánico disuelto DQO	Biomasa heterótrofa DQO	Definición de los parámetros cinéticos: $\mu_{m,H}$ = Velocidad de crecimiento máxima (T^{-1}) K_S = Constante de semisaturación para S_S ($M_{DQO} L^{-3}$) K_{OH} = Constante de semisaturación para S_0 ($M_{DQO} L^{-3}$) b_H = Constante de velocidad de lisis (T^{-1})

En la figura 11 se muestra la respuesta del sistema cuando el caudal varía suavemente según una curva sinusoidal con un factor punta de 1.5 (aquí participa sólo el incremento de apertura de la válvula), y en la figura 12 cuando el caudal de entrada varía de 0.7 a 1.2 veces el caudal medio teniendo y no teniendo en cuenta el valor de la apertura de la válvula. Hay que tener presente que es muy difícil que variaciones de este estilo se produzcan en una planta real.

En las anteriores dos figuras, el intervalo de medición utilizado es de 1 minuto. Las figuras 13 y 14 muestran que aunque se utilizase intervalos más grandes, el control de variaciones suaves de caudal no se vería muy afectado, pero el sistema reaccionaría mucho peor ante variaciones bruscas de caudal. No tiene sentido utilizar intervalos mucho más pequeños ($< 1 \text{ min.}$), porque el controlador le daría una nueva orden al sistema antes de que hubiera ejecutado la anterior.

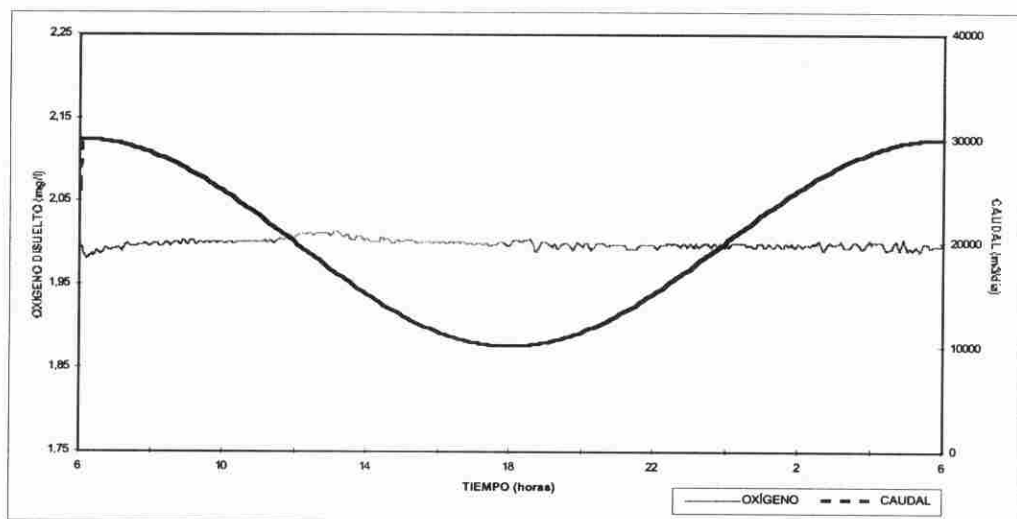


Figura 11. Respuesta ante una entrada sinusoidal

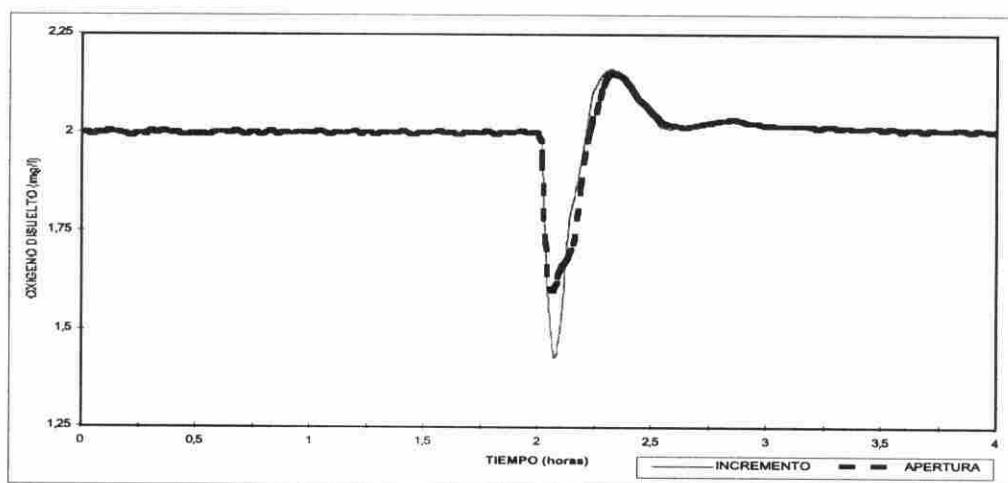


Figura 12. Respuesta ante una entrada en escalón

En la figura 14 se ha representado la respuesta del sistema cuando el caudal de entrada varía de 1 a 1.3 veces el caudal medio. Se puede observar que cuanto menor es el intervalo de medición mejor es la respuesta del sistema, menos bajo el nivel de oxígeno y antes vuelve al valor de consigna.

Optimización del consumo de energía

Para estimar el consumo de energía de los aireadores se dispone de datos suministrados por el fabricante. En el catálogo aparecen datos del consumo en función de la velocidad de giro del

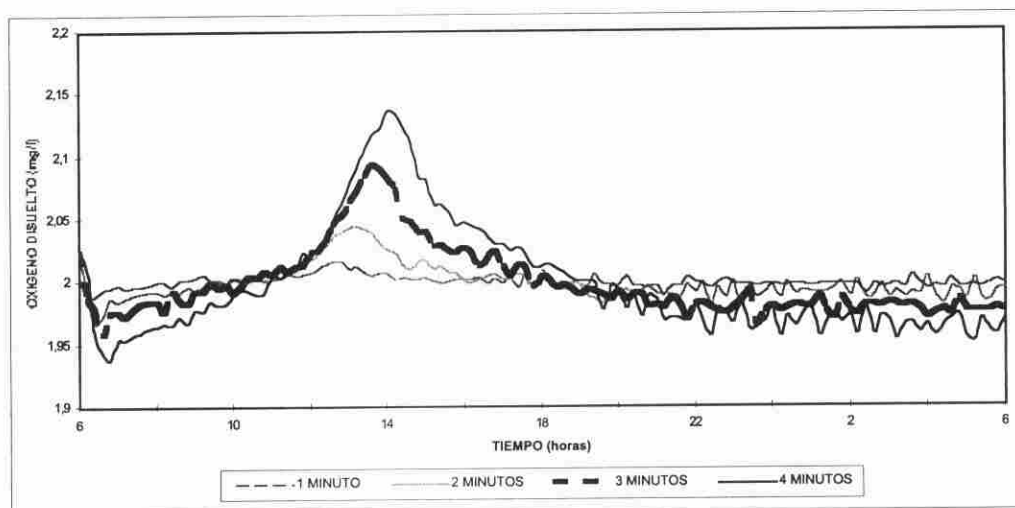


Figura 13. Respuesta ante una entrada sinusoidal

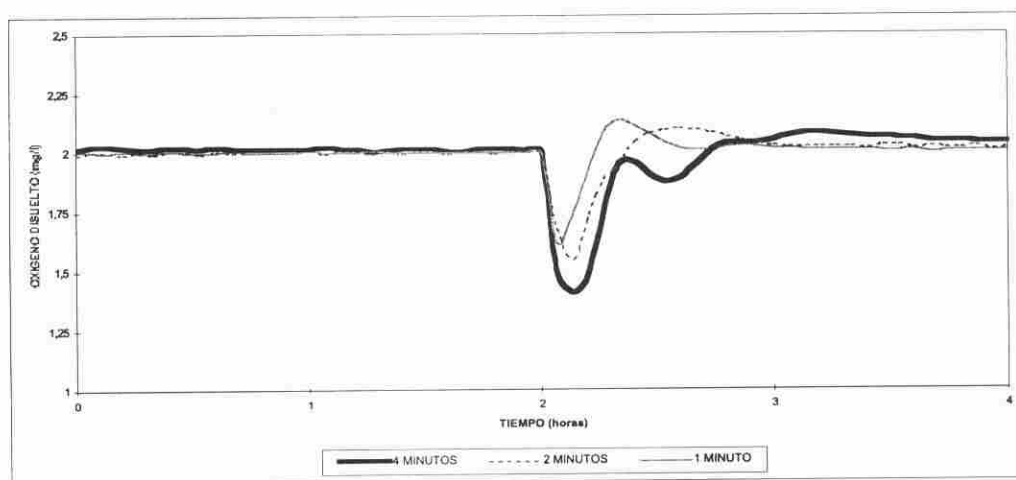


Figura 14. Respuesta ante una entrada en escalón

aireador y del caudal aspirado. Por tanto, para poder estimar el consumo, primero necesitaremos saber la velocidad de giro y el caudal. La velocidad de giro de los aireadores la proporciona el controlador de la presión y el caudal se obtiene resolviendo la siguiente ecuación,

en la que la única incógnita es el caudal.

$$\Delta P_{soplante} = \Delta P_{valvula} + \Delta P_{difusores} + \Delta P_{conduccion} + \Delta P_{hidrostática}$$

Tres son los factores que permiten optimizar el consumo energético: la elec-

ción del número y tipo de aireadores, el funcionamiento de los aireadores y el diseño del sistema de aireación.

- ***Elección del número y tipo de aireadores***

En la elección de los aireadores que se deben utilizar en la aireación de un reactor de fangos activados siempre existen diversas posibilidades. En función de la elección variará ligeramente el consumo energético. La única forma de optimizar el consumo es consultando en el catálogo qué aireador presenta un mejor rendimiento a la presión de trabajo. En el caso que se está simulando, tres posibles elecciones son: 2 aireadores modelo 29.10, 2 aireadores modelo 28.10 o 3 aireadores modelo 26.20. En la figura 15 se muestra cómo varía el consumo energético diario según los aireadores elegidos.

- ***Funcionamiento de los aireadores***

Como resultado del proceso de desfuzificación se obtiene el número total de vueltas al que deben estar girando los aireadores. Cuando hay más de un aireador (algo que sucede casi siempre), esas vueltas pueden repartirse de diversas formas entre los distintos aireadores. Repartiendo de forma adecuada esas vueltas puede obtenerse un ahorro considerable en la energía. Para tal efecto se ha diseñado un sistema experto. Las reglas utilizadas en este sistema para el funcionamiento de los aireadores que proporcionan un funcionamiento óptimo son:

1. Ninguna de los aireadores funcionará nunca a una velocidad inferior al 15% de la velocidad máxima.

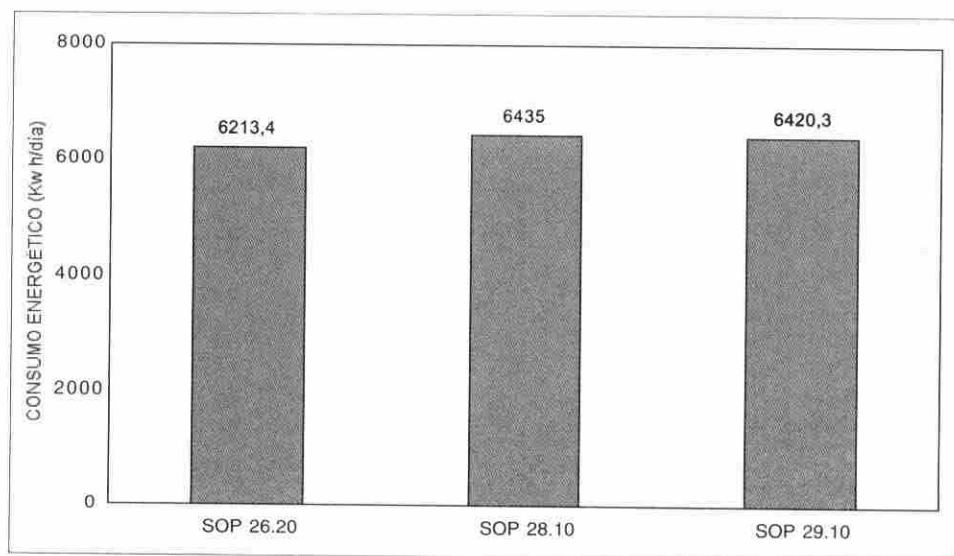


Figura 15. Variación del consumo energético en función de los aireadores

2. El algoritmo de reparto minimizará el número de arranques diarios de los aireadores
3. Funcionarán en el punto de rendimiento óptimo el mayor número de aireadores posible. En este caso, el óptimo se produce para la velocidad máxima, por tanto funcionarán a la velocidad máxima el mayor número de aireadores posible.

En la figura 16 se muestra la diferencia en el consumo energético para el caso de 2 aireadores modelo 28.10 cuando se utiliza este algoritmo de cálculo frente a cuando los dos aireadores giran siempre a la misma velocidad.

Utilizando el algoritmo descrito para el funcionamiento de los aireadores

se consigue un ahorro en el consumo energético del 4%. Este factor es muy interesante porque se puede utilizar siempre, es decir, tanto si se tiene que diseñar el reactor y elegir los aireadores como si el reactor está ya construido y los aireadores elegidos.

- ***Diseño del sistema de aireación***

Para diseñar el sistema de aireación hay que fijar el caudal que se desea que salga por cada difusor en condiciones punta. Este caudal deberá estar comprendido entre el valor mínimo y el valor máximo recomendados por el fabricante. Además, el valor de la densidad de difusores necesaria deberá estar comprendido también entre el valor mínimo y el valor máximo recomendados por el fabricante. Un valor de dise-

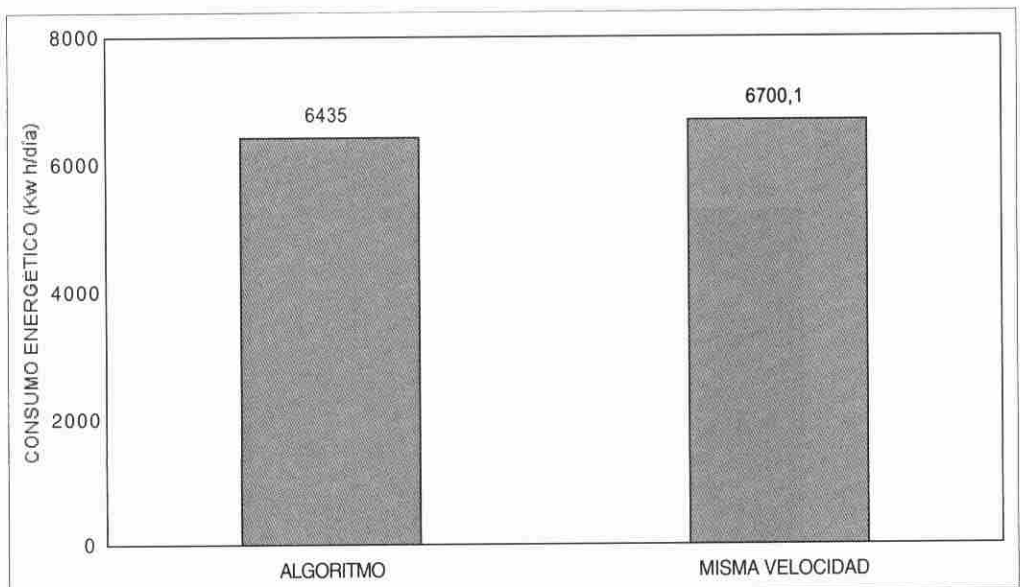


Figura 16. Variación del consumo energético según el funcionamiento de los aireadores

ño normal consiste en fijar el caudal por difusor en un 80% del caudal máximo. No conviene fijarlo muy cerca del 100%, para no dejar al sistema sin capacidad de respuesta. El rango de caudales recomendado para los difusores utilizados en este trabajo es de 1-6 m³/h. En un principio se fijó el caudal por difusor en 5 m³/h.

Si se analiza qué sucede si se disminuye el caudal por difusor fijado para condiciones punta, se tiene lo siguiente:

- Al salir menos aire por cada difusor se necesitan más difusores para conseguir la misma cantidad de oxígeno transferido. Esto provoca un aumento en el costo inicial.
- Al disminuir el caudal por difusor disminuye la pérdida de carga en los difusores. Eso se traduce en una dis-

minución de la presión de trabajo. Como los aireadores tienen que comprimir menos el aire, el consumo energético es menor.

- Al disminuir el caudal por difusor aumenta la eficacia en la transferencia de oxígeno. Además, por el hecho de aumentar la densidad de difusores también aumenta la eficacia. Por tanto, si se disminuye el caudal por difusor aumenta la eficacia en la transferencia de oxígeno y se necesitará introducir una menor cantidad de aire. Eso se traduce en una reducción en la velocidad de giro de los aireadores. Cuanto más despacio giren los aireadores menor será su consumo energético.

Así que reduciendo el caudal máximo por difusor aumenta la inversión inicial y se reduce el consumo energético.

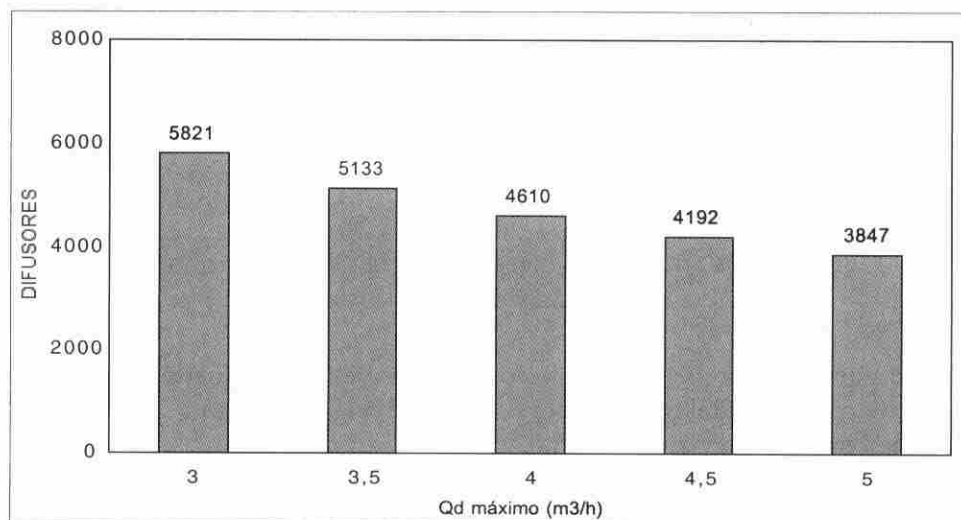


Figura 17. Variación del número de difusores en función del caudal máximo por difusor

co. Al reducir el caudal por difusor, el número de difusores aumenta y también su densidad. Se podría reducir el caudal por difusor hasta que la densidad de difusores llegue a su valor máximo (usualmente de 6 difusores/m²).

En las figuras 17 y 18 se observa cómo varía el número de difusores y el consumo energético en función del caudal por difusor fijado para condiciones punta. Para las siguientes comparaciones se han utilizado 2 aireadores modelo 28.10.

pensa aumentar la inversión inicial a costa de ahorrarnos un 11% en el consumo energético de los aireadores. Cabe destacar que la disminución en el consumo es lineal, mientras que el aumento del número de difusores es exponencial. Por otra parte, como ya se ha comentado, cuanto mayor sea la densidad de difusores menores deberán ser las variaciones de la apertura de la válvula y del caudal por difusor. Por tanto, en función de la densidad de difusores varía el centro de las funciones de pertenencia de las variables de salida.

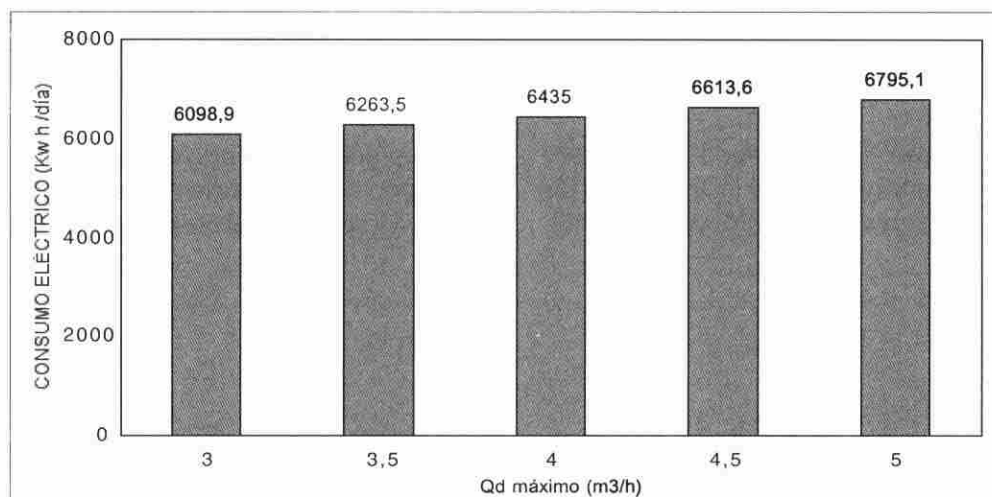


Figura 18. Variación del consumo energético en función del caudal máximo por difusor

En la figura anterior se observa que si se disminuye el caudal máximo por difusor de 5 m³/h a 3 m³/h, el consumo energético se reduce en casi un 11%. Por el contrario, el número de difusores necesarios aumenta en un 50%. Habría que hacer un estudio acerca de si com-

Controlador todo/nada básico o de un nivel de aireación

Tradicionalmente se utiliza un sistema de control basado en el arranque y parada de los aireadores para controlar la concentración de oxígeno disuelto en

un reactor de fangos activados. En este control, los aireadores tienen una única velocidad de giro y el controlador actúa directamente sobre los aireadores, es decir, conecta y desconecta los aireadores en función del oxígeno disuelto. Su funcionamiento es similar al de un termostato. Cuando el oxígeno está por debajo de un determinado valor se pone en marcha el aireador, y cuando está por encima de otro valor se desconecta.

En la figura 19 se muestra cómo varía la concentración de oxígeno disuelto a lo largo de un día utilizando este controlador y utilizando el controlador desarrollado basado en lógica difusa. La comparación se ha hecho utilizando 2 aireadores modelo 28.10 y con el diseño del sistema de aireación hecho para un caudal máximo por difusor de $4 \text{ m}^3/\text{h}$. Debido a que la aireación también lleva a cabo la agitación, no pode-

mos dejar de airear en ningún instante. Esto significa que en el controlador basado en el arranque y parada de los aireadores, uno de los aireadores estará siempre funcionando y el otro se conectará y se desconectará en función del oxígeno disuelto. Cuando el oxígeno descende por debajo de 1.95 mg/l se conecta, y se desconecta cuando el oxígeno está por encima de 2.05 mg/l .

Utilizando el sistema de control basado en el arranque y parada de los aireadores se observa que durante las segundas 12 horas el oxígeno está bastante por encima de 2 mg/L . Eso se debe a que aunque sólo funciona un aireador, dado que entra muy poco caudal, el oxígeno aportado es más que suficiente.

En la figura 20 se muestra el consumo energético del controlador basado en el arranque y parada de los aireadores

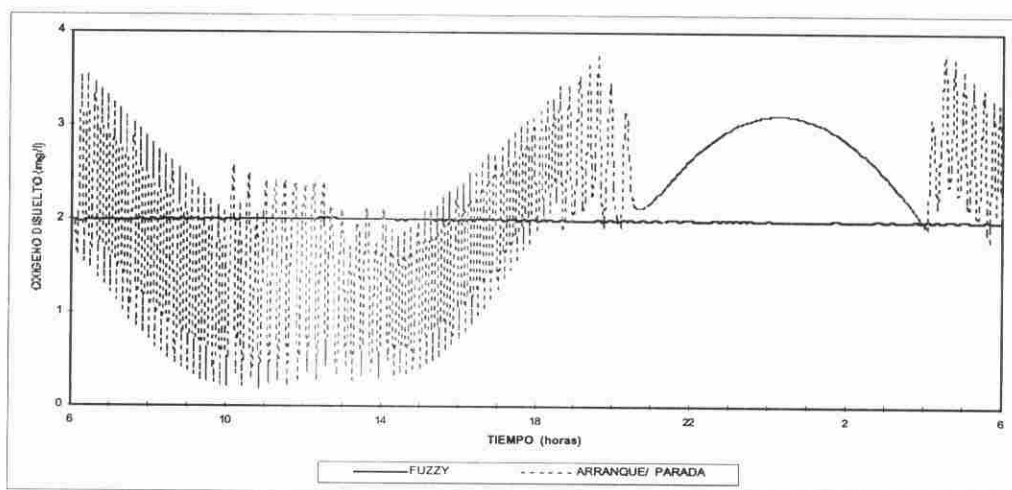


Figura 19. Respuesta ante una entrada sinusoidal de ambos controladores

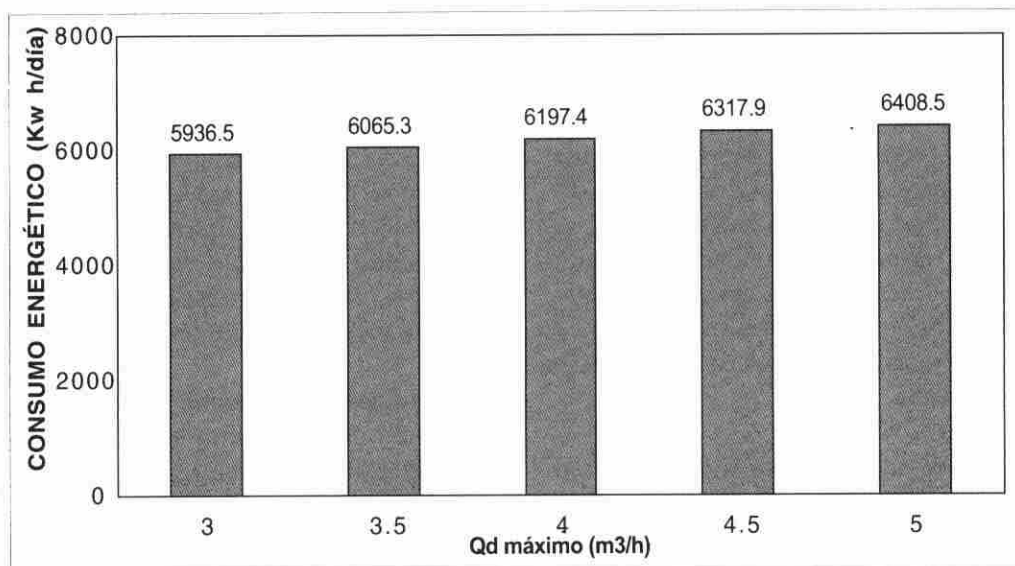


Figura 20. Variación del consumo energético en el controlador basado en el arranque y parada de los aireadores

en función del caudal máximo por difusor fijado en el diseño.

En la figura anterior se observa que al igual que pasaba en el controlador difuso, al aumentar la densidad de difusores (disminuyendo el caudal máximo por difusor) disminuye el consumo energético. Los motivos son los mismos que en el caso anterior: una mayor eficacia en la transferencia de oxígeno y una menor presión de trabajo.

Mediante la comparación de los resultados obtenidos para ambos controladores se tiene que:

- El control del oxígeno disuelto conseguido con el controlador difuso es

mucho mejor que el conseguido con el controlador todo/nada básico. Este último controlador provoca oscilaciones importantes (0.5-3.5 mg/l) en la concentración de oxígeno. Valores muy bajos del oxígeno disuelto pueden provocar problemas en el proceso de nitrificación y, por otra parte, recircular una corriente con una concentración de oxígeno muy elevada disminuye la eficacia de la desnitrificación.

- El controlador difuso es capaz de airear varios reactores con un solo conjunto de aireadores, ya que cada reactor tiene su propio controlador del oxígeno que modifica la apertura de su válvula. Esto no sucede con el otro controlador, porque actúa

midiendo el oxígeno disuelto y conectando o desconectando los aireadores. Si hay varios reactores y sólo un conjunto de aireadores, es imposible obtener un buen control, porque se trabajaría con el valor medio. Eso podría causar problemas tales como que un reactor necesite más oxígeno pero no se conecte el aireador porque la media de oxígeno en todos los reactores sea la adecuada.

- Se observa que el consumo de energía en el controlador basado en el arranque y parada de los aireadores es ligeramente inferior (1%-3%). Este menor consumo de este controlador no es del todo cierto, porque hay un factor que no se ha tenido en cuenta: el número de puestas en marcha de los aireadores que se produce con cada controlador. Mientras que en el sistema de control desarrollado una de las reglas del algoritmo de funcionamiento de los aireadores era minimizar el número de arranques de los aireadores, el otro controlador se basa en todo lo contrario, en conectar y desconectar los aireadores. Eso se traduce en un costo adicional de energía y afecta la vida de los aireadores. Además, este hecho lleva a utilizar un intervalo de medida de más de 5 minutos, ya que de esa forma se asegura que entre dos arranques transcurrirán al menos 10 minutos.

CONCLUSIONES

Se ha desarrollado un sistema de control para la aireación en un proceso de fangos activados basado en la lógica difusa. Este sistema controla la concentración de OD en los reactores aireados y la presión a la salida del aireador. El OD es controlado, por una parte, mediante el uso de válvulas de control y, por otra, mediante la modificación de la velocidad rotacional de los aireadores. Las simulaciones muestran que el controlador difuso presenta las siguientes ventajas frente al controlador todo/nada básico:

- El controlador difuso permite llevar a cabo un control independiente del OD en varios reactores aireados trabajando con un único conjunto de aireadores. Por lo que pueden establecerse diferentes valores de consigna en el nivel de OD en cada uno de los reactores aireados. Esto es posible, ya que se hace un control de la presión a la salida del aireador.
- Un importante mejoramiento en la estabilidad del proceso de fangos activados se logra utilizando el controlador difuso. La concentración de OD está siempre cerca del valor de consigna para el OD.
- Mediante el uso del controlador difuso, los aireadores no están continuamente conectándose y desconectándose. Esto disminuye, por una parte, el consumo energético y, por otra, alarga la vida de los aireadores.

Bibliografía

- HENZE, M., GUJER, W., MINO, T., MATSUO, T., WENTZEL, M. y MARAIS, G.V.R. (1995). «Activated Sludge Model N° 2». IAWQ Scientific and technical report. London, IAWQ.
- HEWITT, C. (1996). «Programmable aeration control system reduces plant energy costs». *Water-Engineering & Management*, 143 (5), 30-33.
- LINDBERG, C.F. and CARLSSON, B. (1996). «Non-linear and set point control of the dissolved oxygen concentration in an activated sludge process». *Wat. Sci. Tech.*, 34 (3-4), 135-142.
- NAM, S. W., MYUNG, N.J., LEE, K.S. (1996). «On-line integrated control system for an industrial activated sludge process». *Water Environment Research*, 68 (1), 70-75.
- TSAL, Y.P., OUYANG, C.F., CHIANG, W.L. and WU, M.Y. (1994). «Construction of an on line fuzzy controller for the dynamic activated sludge process». *Water Research*, 28 (4), 913-921.