

Control del proceso de ciclos alternados para la eliminación eficiente de contaminantes en una edar



ALTERNATED CYCLES PROCESS CONTROL FOR EFFICIENT POLLUTANT REMOVAL IN A WWTP

DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/5823> | Recibido: 29/04/2013 • Aceptado: 11/10/2013

Pedro Tomás Martín de la Vega-Manzano, Miguel Ángel Jaramillo-Morán, Enrique Martínez de Salazar-Martínez

UNIVERSIDAD DE EXTREMADURA. Escuela de Ingenierías Industriales. Avda. de Elvas, s/n- 06006 Badajoz.
Tfno.: +34 924 289600. pedromm@unex.es

ABSTRACT

• In this work a rule-based control strategy is proposed in order to update the management of a Wastewater Treatment Plant by means of the alternating aeration/non-aeration process with the aim of improving the removal rate of the pollutant nitrogen and phosphorous the plant receives along with a decrease in the electric energy consumption. This process is to be carried out without jeopardizing the success in removing the organic matter and suspended solids the current regulations impose about water quality driven into surface streams. The control system has been tested in an actual plant and an efficiency of 85 % in nitrogen removal was obtained as against 35 % previously reached. For phosphorous the removal efficiency raised from 13% to 55%. An electric energy saving of 31% was also reached. On the other hand the organic matter removing rate showed a little increase from 90% to 92%. A reduction in sludge generation along with an improvement in the stability of microorganisms processing pollutants have been also reported, two facts that improve working and maintenance processes.

• Keywords: Wastewater Treatment Plant, Control, Alternating Cycles.

RESUMEN

En el presente trabajo se propone una estrategia de control basada en reglas para actualizar la gestión de una Estación Depuradora de Aguas Residuales (EDAR) mediante el proceso de alternancia de ciclos de aireación/no aireación con el objetivo de mejorar el rendimiento en la eliminación de la carga contaminante de nitrógeno y fósforo que la planta recibe, así como obtener una reducción de su consumo energético. Todo ello sin comprometer la eficiencia en la eliminación de materia orgánica y sólidos en suspensión que exige la normativa vigente de calidad del agua vertida a los cauces receptores. El proceso ha sido probado en una planta real obteniéndose una eficiencia en la eliminación del nitrógeno del 85% frente al 35% original y del 55 % frente al 13 % para el fósforo. Se consiguió también un ahorro del consumo eléctrico del 31%. La eficiencia en la eliminación de la materia orgánica pasó del 90% original al 92%. Se ha verificado la reducción de la producción de fangos y la mejora en la estabilidad de los microorganismos encargados del proceso de reducción de contaminación, con las consecuencias positivas sobre los procesos de operación y mantenimiento.

Palabras clave: Estación Depuradora de Aguas Residuales, EDAR, Control, Ciclos Alternados.

1. INTRODUCCIÓN

Las sociedades desarrolladas se han acostumbrado a disponer de agua potable de forma barata e ilimitada, por lo que enormes cantidades son consumidas a diario. Ello da lugar a la generación paralela de unas cantidades análogas de aguas residuales que suelen ser vertidas a los cauces de agua próximos. El grave problema de contaminación que se genera es obvio: las aguas residuales contaminan las fuentes de las que se extraen las potables. En consecuencia, para poder seguir disponiendo de este recurso en las cantidades demandadas por la sociedad, empieza a ser fundamental el tratamiento de las aguas residuales producidas por la actividad humana. El problema es de tal magnitud que la disponibilidad futura de agua para el consumo humano puede verse comprometida si no se adoptan medidas para que las aguas vertidas a los cauces sean lo menos contaminantes posible. Para ello los gobiernos han empezado a emitir directivas cada vez más restrictivas sobre cargas contaminantes permisibles en los vertidos de aguas residuales, imponiendo la necesidad de construir plantas para su tratamiento antes de ser vertidas a los cauces naturales, con el objetivo de eliminar la mayor parte de la carga contaminante que llevan.

En esta línea, la Directiva Europea 91/271/CE ya exigía la implantación de depuradoras en aglomeraciones urbanas de más de 10.000 habitantes-equivalentes (definiendo a la par el concepto de habitante-equivalente como la necesidad de consumir 60 gr de O₂ por día en los procesos depurativos) antes de enero de 2001, y antes de enero de 2006 a las de más de 2.000 habitantes-equivalentes. Dicha directiva es trasladada al marco legal español mediante el RD 509/1996, en el que se fijan, entre otros, los requisitos de calidad que deben cumplir los vertidos procedentes de las Estaciones Depuradoras de Aguas Residuales (EDARs), identificándose contaminantes orgánicos, medidos en forma de Demanda Biológica de Oxígeno (DBO) o Demanda Química de Oxígeno (DQO), contaminantes particulados, medidos en forma de Sólidos en Suspensión Totales (SST), y, finalmente, nutrientes, en este caso nitrógeno y fósforo. Se definen, así mismo, Zonas Sensibles, esto es, regiones con límites muy restrictivos en la contaminación.

Posteriormente, en la Resolución del 10 de julio de 2006 de la Secretaria General para el Territorio y la Biodiversidad se amplía la declaración de las Zonas Sensibles en las Cuenas Hidrográficas Intercomunitarias (CHI), modificando el mapa depurativo español al incrementar significativamente el número de EDARs afectadas. Como consecuencia, prácticamente la totalidad de las poblaciones españolas superiores a 10.000 habitantes-equivalentes pasan a ser consideradas como Zonas Sensibles.

La aplicación de estas normas tiene una repercusión especialmente importante en la Comunidad Autónoma de Extremadura, puesto que las dos cuencas hidrográficas que la atraviesan, la del Guadiana y la del Tajo, son CHI, por lo que el número de EDARs afectadas representa un porcentaje bastante alto del total. Además, la peculiar distribución de la población, caracteriza por la existencia de un gran número de pequeñas poblaciones muy separadas entre sí, hace que se genere un gran volumen de contaminación difusa incontrolada.

Como es lógico, la construcción de nuevas plantas depuradoras se hará teniendo en cuenta las exigencias técnicas impuestas en la normativa actual, mientras que las plantas ya construidas deberán modificar su funcionamiento para adaptar sus capacidades depurativas a esas normativas.

La mayor parte de las plantas existentes en la región son

del tipo de Aireación Prolongada, con reactores biológicos aireados por soplantes (especialmente en instalaciones medianas y pequeñas) que funcionan según una programación de tiempos *on/off*, siendo habitual que la dosificación de oxígeno sea insuficiente ante picos de carga orgánica, lo que provoca una deficiente eliminación de materia orgánica, y excesiva ante cargas diluidas, lo que provoca un desperdicio de energía [1]. Habitualmente, este proceso trabaja en las fases de respiración endógena de la curva de crecimiento, es decir, baja carga con un tiempo de aireación prolongado, lo que implica una alta disponibilidad volumétrica [2]. Es por ello que los problemas de sobreaireación aparecen habitualmente en este tipo de EDARs, provocando que las descargas de nitrógeno (fundamentalmente en la forma de nitratos) y los consumos energéticos sean realmente altos. Teniendo en cuenta que el mayor porcentaje de consumo energético en estas plantas se lo llevan los procesos de aireación, variando entre un 50% y un 90% del consumo total, la actualización del control de la aireación para garantizar una eliminación eficiente de los contaminantes podría llevar aparejada una disminución de los costes de explotación de la planta, lo que representaría un valor añadido al proceso nada desdeñable.

Por todo ello se decidió abordar la actualización de una EDAR que fuese representativa del conjunto de las de mediano tamaño, instaladas en Extremadura desarrollando un sistema de control de los ciclos de aireación/no aireación que permitiese una gestión eficiente del proceso. Se partió de la premisa de desarrollar un sistema de fácil y rápida implantación, robusto y con accesibilidad remota, el cual, basado en la gestión de la eliminación de la materia orgánica a través de los procesos de oxidación-reducción que tienen lugar en la masa líquida, permitiera una correcta eliminación de contaminantes junto con el ahorro energético que suponen las paradas de las soplantes. El control planteado, basado en la gestión de la materia orgánica en la propia cuba de aireación, aseguró, además, la estabilidad de la biota, evitando los fenómenos de desequilibrio en el proceso de decantación. A este hecho se unió una reducción apreciable de la producción de fangos, con el consecuente ahorro energético y ventajas para los procesos de operación y mantenimiento.

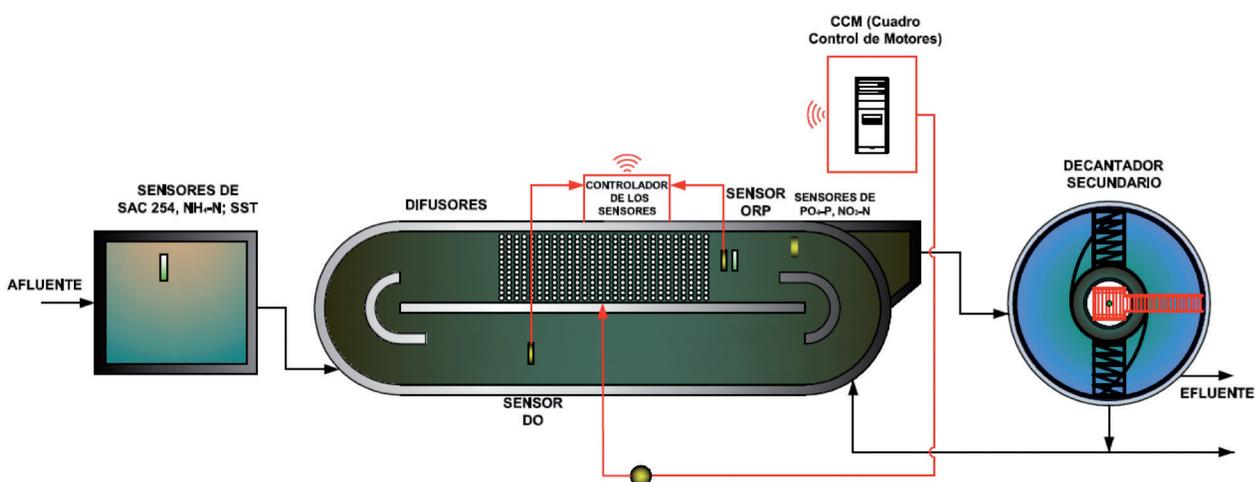


Fig. 1: Esquema de uno de los dos reactores utilizados en la planta real con indicación de la localización de los sensores empleados

2. MATERIALES Y METODOS

2.1. EL PROCESO DE AIREACIÓN PROLONGADA EN UNA PLANTA DE TRATAMIENTO DE LODOS ACTIVOS

2.1.1. Eliminación de materia orgánica

El funcionamiento de una EDAR se basa en un tratamiento biológico de las aguas residuales en el que, en una vasija, se agita y airea una mezcla de ese agua con un fango formado por microorganismos, los cuales utilizan la materia orgánica aportada como alimento. A continuación, en otro recipiente, el fango decanta recogiendo en los niveles inferiores. Una parte es purgada del sistema y otra es devuelta al reactor biológico. El proceso de Aireación Prolongada representa una de las posibles opciones de funcionamiento de estas instalaciones. Se basa en el mantenimiento de una relación de materia orgánica/microorganismos baja con un tiempo de contacto entre ambos alto. De esta forma se fomenta la respiración endógena, entendida como un proceso de lisis microbiana para mantener la biomasa activa.

En cuanto a la configuración hidráulica del reactor biológico, suele emplearse el denominado esquema de dique de oxidación (Fig. 1) donde el tanque de aireación tiene una estructura de canales, operando con velocidades de flujo altas generadas por aceleradores de corriente. Se consigue de esta forma asegurar un nivel de homogeneidad en la mezcla de agua contaminada y microorganismos alta.

A pesar de poseer un buen rendimiento en la reducción de contaminación, acompañado de la generación de un fango en exceso con alto porcentaje mineral, presenta un alto consumo eléctrico por aireación y una alta disponibilidad de volumen. Es por ello, y también por ser uno de los procesos con mayor nivel de implantación a nivel nacional, por lo que se va tratar de optimizar su control mediante la inclusión de un proceso de alternancia de ciclos de aireación/no aireación.

2.1.2. Eliminación de nitrógeno mediante el proceso de alternancia de ciclos

Aunque la adecuada aireación del proceso de metabolismo bacteriano permite eliminar una gran parte de la materia orgánica contaminante, la eliminación de nitrógeno no está garantizada. Solo hace unos pocos años se ha empezado a estudiar su tratamiento impulsado por las normativas medioambientales que imponen su eliminación. Este proceso pasa por la generación de las condiciones necesarias para fomentar un tipo de bacteria que oxide el amonio afluente a nitrato, de forma que, mediante un ciclo de no-aireación adecuado en el que se alcance un régimen de ausencia de oxígeno, se propicie la desnitrificación mediante la reducción del nitrato a nitrógeno gaseoso, que será liberado a la atmósfera. De esta forma, aprovechando que todo el proceso puede llevarse a cabo en un mismo reactor, se implementará un sistema de control de ciclos alternos de aireación y no aireación para garantizar la eliminación tanto de la materia orgánica como del nitrógeno. Durante los ciclos aireados la materia orgánica es eliminada mediante digestión bacteriana aerobia a la par que se fuerza una oxidación del nitrógeno presente en forma de amonio a la forma de nitrato. En el ciclo de no aireación siguiente los nitratos

generados son transformados en nitrógeno gas, requiriéndose, en este caso, una cierta cantidad de materia carbónica residual para que no haya inhibición de este último proceso. La utilización de estos ciclos alternos de aireación/no aireación ya ha sido estudiada, proporcionando buenas tasas de eliminación del nitrógeno presente en las aguas residuales [3-6]. La clave para la obtención de buenos rendimientos energéticos y depurativos está en la cuantificación de la materia orgánica que el ciclo de aireación no oxida, siendo esta empleada para fomentar la reducción de nitratos en el subsiguiente ciclo de no aireación.

2.1.3. Eliminación de fósforo mediante el proceso de alternancia de ciclos

En las plantas de tratamiento de fangos activos convencionales la eliminación de fósforo está ligada al crecimiento bacteriano, ya que es utilizado por estos microorganismos en sus procesos de crecimiento celular. Por este medio se consume entre el 10 y el 30 % de la carga de fósforo que recibe la planta [2], siendo necesario en muchos casos recurrir a procesos de precipitación química para la eliminación de este nutriente de las aguas, por norma general basados en la adición de cloruro férrico, con el consiguiente incremento de los costes de gestión que esto supone. Con el fin de aumentar su tasa de eliminación se ha desarrollado el proceso conocido como *Eliminación Biológica de Fósforo Potenciada* (EBPR, *Enhanced Biological Phosphorous Removal*), con el cual se persigue un aumento del porcentaje de eliminación de esta sustancia mediante el enriquecimiento del fango en exceso con organismos acumuladores de fosfatos (PAO, *Polyphosphate Accumulating Organisms*), evitando así el tratamiento químico. Estas bacterias tienen la peculiaridad de acumular fósforo, en la forma de polifosfatos, más allá de sus necesidades metabólicas durante la fase aerobia. Su aparición se fomenta mediante el proceso de alternancia de ciclos de aireación/no aireación, siempre que en los ciclos de no aireación se consiga alcanzar un estado de ausencia de oxígeno y nitratos, esto es, alcanzar regímenes anaerobios [7]. Necesitan, además, la presencia de ácidos grasos de cadena corta, que suelen encontrarse presentes en las aguas residuales urbanas en una proporción del 5-8 %, [8]. Así, en la fase anaerobia, en la que debe haber disponible suficiente materia orgánica carbonosa, los PAOs metabolizan es-

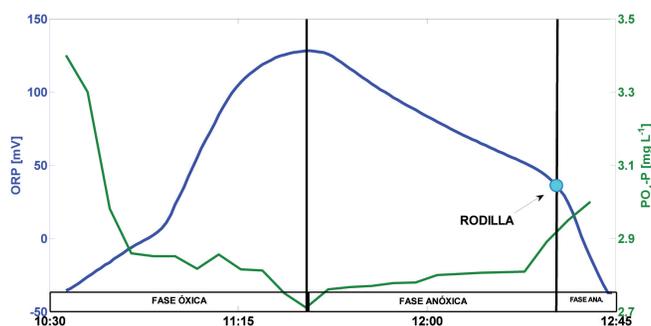


Fig. 2: Evolución de la concentración del fósforo en la vasija del reactor durante una alternancia de ciclos. La transición entre la fase anóxica (soplantes apagadas) y anaerobia (ausencia de oxígeno y nitratos) viene marcada por una brusca caída en la curva de ORP (rodilla)

tos compuestos de carbono liberando una parte de los polifosfatos, que se acumulan en el medio que les rodea en forma de ortofosfatos [9]. En la siguiente fase aerobia el proceso se invierte, al asimilar los PAOs el exceso de fosfatos presentes en el reactor con el objetivo de poder ser utilizado en la siguiente fase anaerobia. El proceso puede verse claramente en la Fig. 2. Si en la etapa aerobia se elimina del reactor parte del fango, se eliminará también el fósforo que acumula la población bacteriana. La regeneración de la población bacteriana así forzada facilita aún más la eliminación del fósforo al consumirlo para su crecimiento.

2.2. PLANTA REAL

La planta en la que se ha aplicado el control desarrollado es la de la localidad de Oliva de Fronteras, situada al suroeste de la provincia de Badajoz. Su principal actividad económica es la industria agroalimentaria, por lo que se puede afirmar que las aguas residuales a tratar serán principalmente de carácter urbano.

Esta planta comparte el mismo sistema de tratamiento que el 70% de las de la provincia de Badajoz: el de Aireación Prolongada. Cuenta con dos reactores con estructura de dique de oxidación (Fig. 1). Fue diseñada para 12.000 habitantes-equivalentes. Cada reactor cuenta con dos turbocompresores, cada uno de ellos con dos velocidades de funcionamiento: una con una potencia de 31 kW y otra con una potencia de 41,2 kW. El control de la planta estaba diseñado para utilizar únicamente la potencia más baja de cada turbocompresor, lo que hacía que la potencia consumida durante un ciclo de aireación fuera de 62 kW.

El control de la aireación lo realizaba un sistema SCADA a partir de la medida proporcionada por una

sonda de oxígeno, desconectándola cuando se medía un valor superior a los 2 mg/l y conectándola cuando éste llegaba a cero.

La gestión de la aireación ha sido actualizada mediante la inclusión de un nuevo controlador que actúa directamente

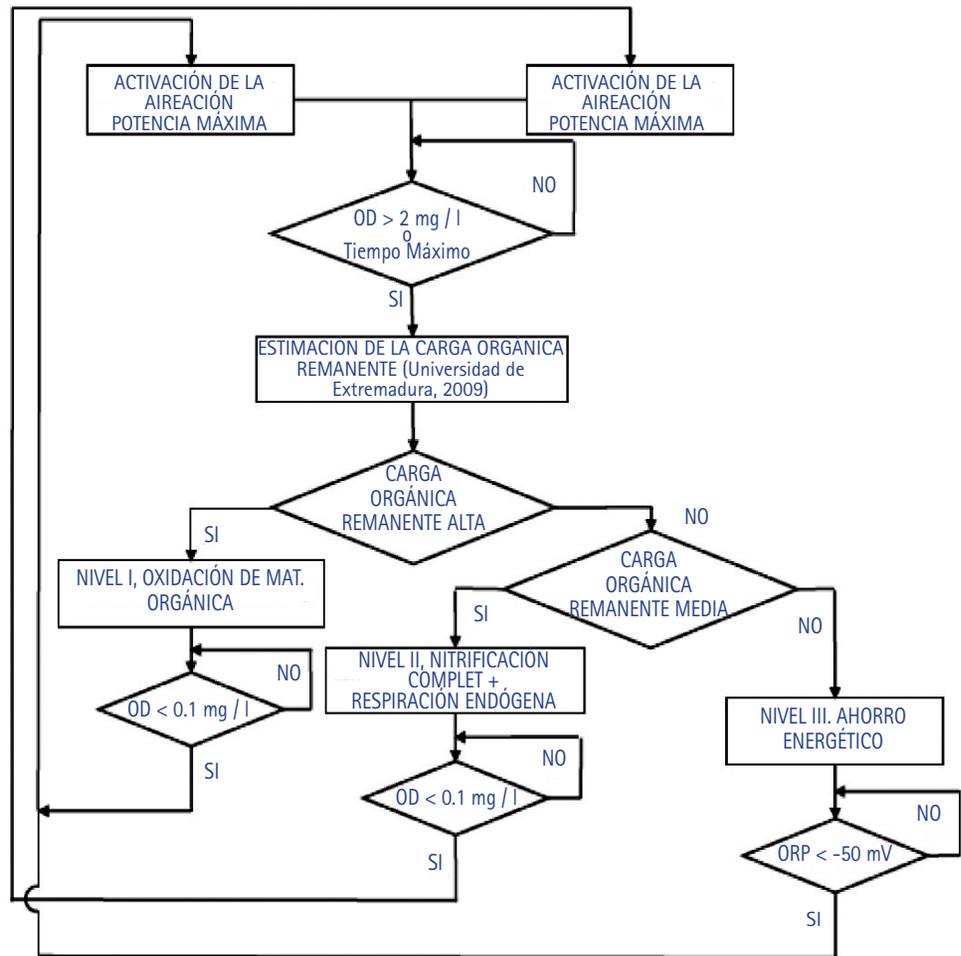


Fig. 3: Diagrama de flujo del proceso de control de los ciclos de aireación y no aireación

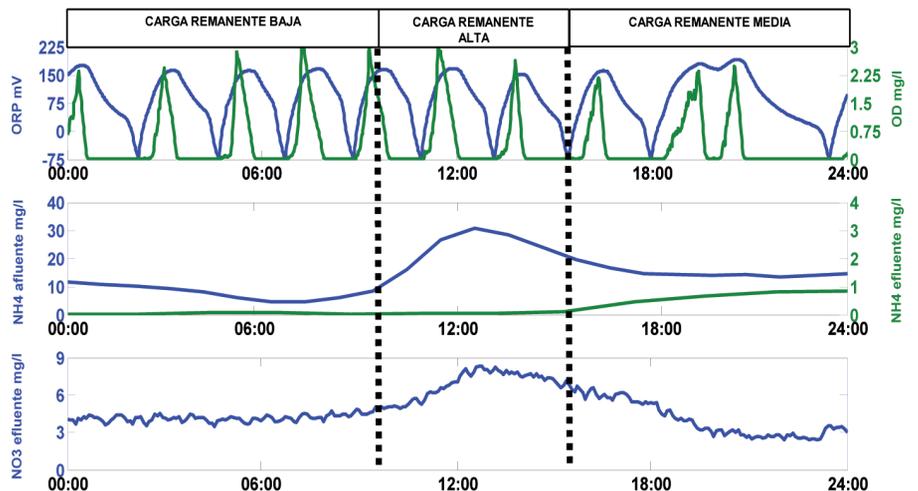


Fig. 4: Perfil diario de las señales utilizadas para el control del proceso, OD y ORP, y de las empleadas

sobre el cuadro de control y mando (CCM) de las soplantes en base a la interpretación de las señales de dos sensores: uno de oxígeno disuelto (OD) y otro de *Potencial de Oxidación-*

de las soplantes a la máxima potencia, generando, por tanto, una fase de aireación. Su objetivo es proporcionar un aumento del nivel de oxígeno disuelto. Las soplantes permanecerán co-

La implantación del sistema es sencilla, por lo que los costes de implantación son realmente bajos



Reducción (ORP, del inglés Oxidation Reduction Potential). Estas señales se transmiten mediante una red inalámbrica desde el controlador de dichos sensores al CCM, en el que un modem GPRS realiza la conexión remota y la gestión tanto de los parámetros de control como de los datos acumulados.

2.3. SENSORIZACIÓN DE LA PLANTA REAL

Son numerosos los autores que han utilizado las mediciones de OD, ORP o pH como variables para controlar los procesos de alternancia de ciclos aireación/no aireación [3, 4, 10,11]. Es por ello que se han seleccionado dichos parámetros para realizar el control del proceso. El pH ha sido descartado, ya que su valor varía poco debido a la gran dilución empleada en el reactor. Ello supone que, para realizar el control de la planta, únicamente se necesita añadir una sonda de ORP cuyo coste no es muy alto.

2.4. CONTROL INTELIGENTE DEL PROCESO DE AIREACIÓN

El control del proceso de aireación busca el ajuste de la duración de los ciclos de encendido y apagado de las soplantes con el objetivo de cumplir tres premisas de eficiencia: eliminación de materia orgánica, eliminación de nitrógeno (y en paralelo también de fósforo) y ahorro energético. Las dos primeras persiguen el cumplimiento de la normativa vigente sobre vertidos y constituyen el objetivo básico de todo el proceso de actualización de la planta. La tercera, al no estar ligada al cumplimiento de esa normativa, se podría considerar como un objetivo secundario del control. Sin embargo, la obtención de un ahorro en los costes de explotación, facilitado por la reducción del consumo eléctrico, puede hacer que el control propuesto sea más atractivo para las empresas encargadas de la explotación de las instalaciones, representando un valor añadido al proceso de actualización de las EDAR existentes.

Para determinar la duración de los ciclos de encendido y apagado se ha diseñado un control inteligente basado en reglas que ajusta el nivel de potencia de los aireadores. Se ha optado por un control inteligente para poder hacer uso de la información recopilada sobre la dinámica de la planta y convertirla en una serie de supuestos y reglas que, como se verá a continuación, pueden ser programados de forma sencilla.

El proceso de control (Fig. 3) se inicia con el encendido

nectadas mientras no se supere una referencia preestablecida de oxígeno, cuyo valor se ha prefijado en 2 mg/l. Aunque este valor ha sido obtenido a partir de la bibliografía [12, 13], las numerosas pruebas realizadas han demostrado que esta referencia de oxígeno es apropiada para obtener una transformación eficiente de amonio en nitrato, así como para permitir que una fracción de la materia carbónica se acumule en el reactor.

Una vez paradas las soplantes se inicia un ciclo de no aireación, momento en el que se estima la materia orgánica remanente según una técnica patentada por los autores [14]. A partir de esta estimación se optará por una de tres posibles acciones de control, cada una asociada a una premisa de eficiencia:

- CARGA ALTA (Fig. 4). El controlador dará prioridad a la eliminación de materia orgánica con el objetivo de asegurar la oxidación de la misma, aun a costa de propiciar un aumento de la generación de nitratos causada por una excesiva nitrificación. Para ello se conectan las soplantes a la máxima potencia cuando el valor de OD caiga por debajo de 0.1 mg/l, iniciándose un nuevo ciclo de aireación.
- CARGA MEDIA (Fig. 4). El controlador dará prioridad a la eliminación de nitrógeno, aprovechando la materia orgánica remanente para propiciar la reducción de los nitratos que genera el proceso de CARGA ALTA. Como se aprecia en la Fig. 4, los nitratos experimentan un descenso. El proceso de aireación se reinicia cuando el valor de OD cae por debajo de 0.1 mg/l, conectando las soplantes a una potencia intermedia.
- CARGA BAJA (Fig. 4). El controlador dará prioridad al ahorro energético, manteniendo las soplantes apagadas hasta que el valor de ORP caiga por debajo de un umbral predeterminado, que puede ser ajustado en función del compromiso entre ahorro energético y eficiencia depuradora que se desee conseguir. Cuando este umbral se sobrepasa se asegura una correcta remoción del nitrógeno sin comprometer la calidad del efluente desde el punto de vista de la materia orgánica, ya que esta fase conlleva el uso de materia orgánica como elemento donador de electrones. Una vez se sobrepasa el umbral antes indicado se vuelve a iniciar un ciclo de aireación conectando las soplantes a media potencia. En este caso se ha fijado

un umbral de -50 mV, suficiente para asegurar que el sistema biológico pasa por una fase de ausencia de oxígeno y un muy bajo nivel de nitratos, lo cual propicia las condiciones de anaerobiosis que facilitan la eliminación biológica del fósforo (Fig. 2).

El control inteligente programado dispone también de ciertas restricciones, incluidas como control de emergencias, que eviten que se produzcan ciclos de aireación o no aireación excesivamente largos por causa de circunstancias anómalas o mediciones erróneas de las sondas:

- Cuando el reactor recibe una carga orgánica por encima de sus posibilidades de tratamiento, los sistemas de aireación no poseen capacidad suficiente para elevar la concentración de OD (debido al gran consumo de oxígeno que una alta carga orgánica provoca), por lo que el umbral de 2 mg/l establecido para desconectar la aireación no se alcanzará y el controlador mantendrá la aireación constantemente encendida, lo que evitaría que se pase a la fase de no aireación en la que los nitratos son reducidos a nitrógeno gaseoso. Esta circunstancia haría que el nitrógeno se acumule en el reactor y no se elimine, incumpliendo la normativa sobre vertidos. Para evitarlo se ha impuesto un tiempo máximo de aireación de 150 minutos. De esta forma, la introducción de un ciclo intermedio de no aireación, favorece en cierta medida, la eliminación de un porcentaje de nitrógeno, manteniendo un límite de vertido aceptable.
- Cuando la relación materia orgánica remanente/nitratos es baja, el controlador prolongará la fase de no aireación hasta alcanzar el límite de -50 mV, de forma que, con el objetivo de evitar una acumulación excesiva de amonio por falta de oxidación, se ha establecido la restricción de imponer una duración máxima de 180 minutos para el ciclo de desnitrificación.

3. RESULTADOS

3.1. RENDIMIENTO DE REMOCIÓN DE MATERIA ORGÁNICA

La evaluación del rendimiento en la eliminación de la materia orgánica se ha realizado a partir del rendimiento de la reducción de la DQO. De esta forma, y a partir de los datos analíticos de un año de trabajo, se concluye que se ha experimentado un ligero incremento en el rendimiento, alcanzándose el 92%, cuando el valor obtenido antes de la actualización era algo superior al 90%. El control propuesto ha permitido gestionar la eliminación de la materia orgánica de forma eficiente, manteniendo las prestaciones ya alcanzadas, pero realizando también un tratamiento adecuado del nitrógeno y del fósforo que facilita su eliminación. La inclusión de ciclos de no aireación no ha afectado al rendimiento en la eliminación de materia orgánica ya que ha sido eficientemente tratada mediante su oxidación cuando su eliminación era prioritaria. En los ciclos de no-aireación la materia orgánica remanente puede ser también eliminada al donar sus electrones en el proceso de reducción de nitrato a nitrógeno gaseoso.

3.2. RENDIMIENTO DE REMOCIÓN DE MATERIAL NITROGENADO

Previamente a la actualización de la EDAR el sistema estaba sometido a un proceso de sobreaireación, en el cual los nitratos se acumulaban en el reactor biológico al no poderse transformar a nitrógeno gaseoso, incumpliendo los límites legales de vertido. Tras la actualización, los niveles de nitrógeno en la salida de la planta se redujeron de forma significativa, incrementándose el rendimiento de remoción de un 35 % a un 85 %. Una comparativa del rendimiento antes y después de la actualización se muestra en la Fig. 5, donde pueden verse los niveles medios de amonio y nitratos en el efluente medidos por quincenas durante todo un año. Como puede apreciarse claramente, la caída en la concentración tanto de amonio como de nitratos es drástica tras la implantación de la actualización del control por ciclos alternados.

3.3. RENDIMIENTO DE REMOCIÓN DE FÓSFORO

La reducción del fósforo en un proceso de ciclos alternados requiere que se alcancen niveles de anaerobiosis, esto es,

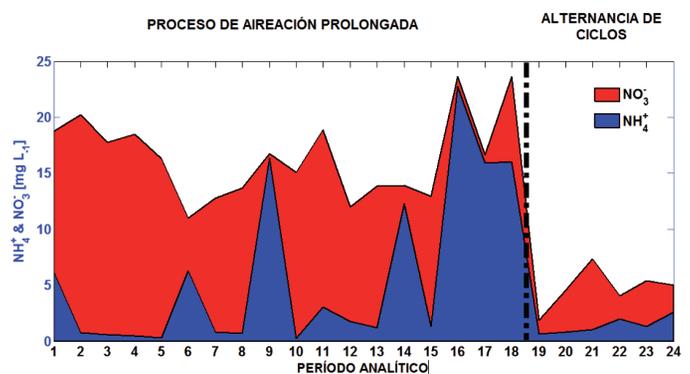


Fig. 5: Niveles de amonio y nitratos en el efluente de la planta medidos como medias quincenales a lo largo del año de prueba (el nitrato se ha añadido al amonio, de forma que la línea superior de la gráfica muestra el nitrógeno total). La línea discontinua marca el momento de actualización de la planta

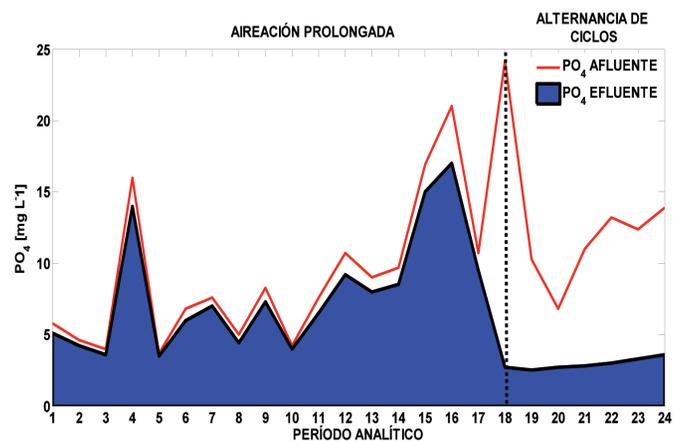


Figura 6: Niveles de fósforo a la entrada y a la salida del proceso. El área marcada en azul marca el fósforo a la salida, mientras que la línea roja marca el fósforo a la entrada

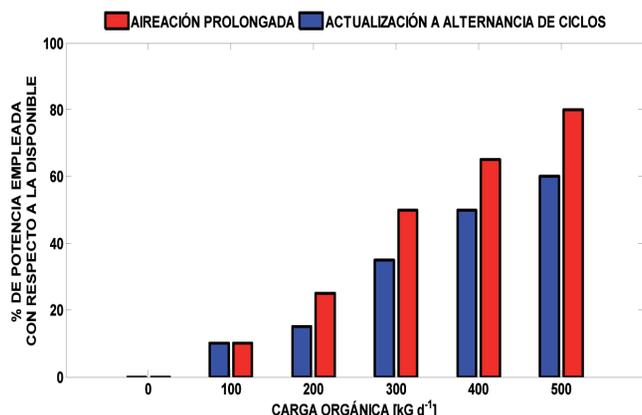


Fig. 7: Comparación de las potencias de aireación aplicadas antes y después de la actualización de la planta frente a la carga orgánica recibida por la planta

ausencia de oxígeno y de nitratos, para que su ciclo metabólico se realice de la forma anteriormente comentada (Fig. 2). Por ello su ejecución estará supeditada a que el proceso de reducción de nitratos en los ciclos de no-airación se complete. Estas circunstancias se alcanzan cuando se está ante una carga remanente baja que activa un ciclo de ahorro energético. La remoción del fósforo se obtiene, como ya se ha comentado anteriormente, por la eliminación durante la fase aeróbica de parte del biolodo, del que forman parte las bacterias metabolizadoras del fósforo. Gracias a la alternancia de ciclos se ha pasado de un rendimiento medio en la eliminación del fósforo del 13 % antes de la implantación de la actualización propuesta a un 55 % después de ella, como muestra la Fig. 6, en la que se observa un descenso notable del fósforo en la salida y, por tanto, un incremento del rendimiento de remoción.

3.4. REDUCCIÓN DE CONSUMO ELÉCTRICO

A la hora de establecer resultados de consumo eléctrico es preciso destacar que la gestión previa de la aireación de la EDAR se basaba en el encendido y apagado de turbosoplantes en base a consignas de oxígeno, con unos tiempos de aireación de 12-14 horas al día. De esta forma se establecía un consumo medio por habitante equivalente de $0.067 \text{ kWh dia}^{-1}\text{h-e}^{-1}$. El ahorro energético obtenido fue de un 31%. Evaluando dicho ahorro energético con respecto al nivel de carga entrante a la planta se pudo comprobar cómo éste aumentaba conforme aumentaba la carga orgánica que la planta recibía, tal y como puede comprobarse en la Fig. 7, un hecho que avala las buenas prestaciones del sistema de control propuesto.

3.5. OPTIMIZACIÓN DE LA OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO DE LA EDAR

Como se ha indicado anteriormente, la aireación representa entre el 50 y el 90 % del consumo de una EDAR. Del resto destacan la energía necesaria para el bombeo de biolodos y la que se consume en el proceso de espesado, estabilización y deshidratación de los que se eliminan. En la EDAR estudiada en este trabajo, al igual que en la totalidad de las de poblaciones comprendidas entre los 2.000 y los 150.000 habitantes, el

fango en exceso se almacena en espesadores, con el objeto de incrementar su concentración y estabilizarlo, para pasar a continuación por un proceso de reducción de su contenido en agua (centrifugación en la planta estudiada) antes de ser retirado en camiones para su gestión posterior. Gracias al sistema de control implementado se ha obtenido una menor producción de fangos, cuantificada por una reducción del número de horas de centrifugado y de las toneladas de residuo seco obtenido tras dicho proceso. Se verificó una reducción del 15% en las horas de centrifuga, manteniéndose el rendimiento de reducción del contenido en agua, proporcionando una reducción final del residuo almacenado del 13 %. Esta mejora en la gestión del biolodo residual se obtuvo gracias al empleo de la materia orgánica en los ciclos de anoxia en la forma descrita anteriormente, optimizándose el proceso de gestión de fangos en la EDAR, consiguiendo una reducción del consumo energético en bombeo de fango recirculado del decantador al reactor de un 10% y de bombeo de purga al espesador de un 15 %.

En lo que respecta a las operaciones de mantenimiento, dos de los problemas más frecuentes que suelen ocupar gran parte de estas operaciones y que comparten las plantas análogas a la descrita en este trabajo son los conocidos como “foaming” y “desnitrificación incontrolada”.

El primero consiste en la formación de una capa de espumas en la superficie del reactor debido a que, en los momentos de CARGA BAJA, el exceso de aireación permite que bacterias filamentosas crezcan en exceso frente a las bacterias formadoras de flóculo. Esas bacterias confieren un carácter hidrófobo al flóculo, de forma que la agitación y la aireación tienden a hacer flotar una notable masa de fango activo, generando una capa de espumas en la superficie que dificulta la operación y mantenimiento de este tipo de instalaciones. Este fenómeno ha sido reducido de forma drástica con el control propuesto, ya que la inclusión de ciclos anóxicos favorece a las bacterias formadoras de flóculo frente a las filamentosas, a lo que hay que unir el hecho de que la gestión de la materia orgánica realizada controla los fenómenos de competencia, evolucionando el sistema hacia la estabilidad bacteriana, reduciendo al máximo los riesgos de “foaming”.

El segundo problema se asocia a la falta de ciclos de anoxia, lo que permite que los nitratos se almacenen en el sistema, concretamente en los decantadores, en los que el manto de fangos tiende a consumir el oxígeno. Se produce así una reducción de dichos nitratos, que se transforman en nitrógeno gaseoso, el cual, en su ascenso hacia la superficie del decantador, arrastra capas de fango, comprometiendo la salida de la instalación. Este problema se acentúa en los climas cálidos, puesto que la temperatura acelera la producción de nitratos. El sistema de control propuesto evita este grave problema al incluir ciclos de anoxia controlados por la materia orgánica remanente que evitan esa formación de nitrógeno gaseoso.

El control de la alternancia de ciclos propuesto no sólo evitó los fenómenos antes mencionado sino mejoró la calidad del fango, como puede comprobarse mediante observaciones al microscopio. Tanto la microestructura de fango, asociada a la comunidad de protistas y a las características físicas del flóculo, como la macroestructura del flóculo, asociada a la mejora de la sedimentabilidad, mejoraron en 25 puntos según el índice propuesto por [15], de forma que se minimizan muchas

de las operaciones de mantenimiento llevadas a cabo, permitiendo trabajar al sistema con un nivel de microorganismos constantes.

4. DISCUSIÓN

La gestión de las EDARs suele ser llevada a cabo por empresas privadas contratadas por la administración pública mediante concurso. Es por ello que la obtención de un ahorro energético en su gestión sin comprometer la eficiencia depuradora de la planta representa un objetivo muy atractivo, ya que permite aumentar los beneficios de la empresa. En esta línea, la presente investigación plantea una estrategia de actualización del control del proceso de aireación basada en la alternancia de ciclos de aireación y no aireación que permite modificar el control del proceso disminuyendo el tiempo de conexión de las soplantes, obteniéndose una mejora en la eliminación de contaminantes (materia orgánica, nitrógeno y fósforo), consiguiéndose, además, una reducción de la producción de fango en exceso, con el consecuente ahorro en los procesos de operación y mantenimiento de la estación depuradora. La implantación del sistema es sencilla, por lo que los costes de implantación son realmente bajos, lo que permite su amortización en un corto período de tiempo. Utiliza los valores proporcionados por una sonda de OD y otra de ORP. Aplicado a una planta real ha proporcionado un incremento notable en las tasas de eliminación de nitrógeno y fósforo, así como una disminución muy importante en el consumo de energía eléctrica, todo ello manteniendo (en realidad superando levemente) las tasas de eliminación de la materia orgánica.

Es preciso resaltar que la actualización que se plantea se ha realizado sobre un proceso de aireación prolongada en dique de oxidación, puesto que se trata de la configuración más extendida en el territorio nacional, si bien, este tipo de proceso de alternancia de ciclos puede ser aplicado sobre configuraciones más clásicas, como puede ser un reactor de mezcla perfecta, o bien, sobre configuraciones más actuales, como puede ser un reactor de membranas.

Los resultados alcanzados justifican la continuación de la investigación para conseguir mejoras aún más significativas en la eliminación de nutrientes, sobre todo en lo que respecta al fósforo. La utilización de herramientas inteligentes más sofisticadas que las aquí descritas, como por ejemplo el control basado en la lógica borrosa, junto con el estudio de los perfiles de las curvas de oxidación pueden facilitar un mejor ajuste de la aireación que redunde en una eliminación más eficiente de los contaminantes mencionados, así como en una reducción aún mayor del consumo energético.

AGRADECIMIENTOS

Esta investigación fue iniciada gracias al proyecto GEEDAR (IDI20080686), financiado por el Centro para el Desarrollo Tecnológico (CDTI) del gobierno de España.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Martín de la Vega P.T., Fernández A., Martínez de Salazar E., Jaramillo M.A. 2011. "Evaluation of municipal wastewater treatment plant with different technologies at Extremadura". En: Actas del congreso internacional SmalWat'11 Wastewater in small communities, (Sevilla 25-28 de abril de 2011), v. III. [S.l.]: CENTA, 2011. P. 113-114
- [2] Tchobanoglous G., Burton F., Stensel H. D. *Wastewater Engineering Treatment and Reuse*. 4ª edición. Nueva York: Mc Graw Hill, 2003, 1848p. ISBN: 978-00-711-2250-4.
- [3] Battistoni P., De Angelis A., Boccadoro R., et al. "An automatically Controlled Alternate Oxidic-Anoxic Process for Small Municipal Wastewater Treatment Plants" *Ind. Eng. Chem. Res.* 2003. Vol. 42 p. 509-515. <http://dx.doi.org/10.1021/ie020376g>
- [4] Nardelli P., Gatti G., Eusebi A.L., et al. "Full-Scale Application of the Alternating Oxidic/Anoxic Process: An Overview". *Ind. Eng. Chem. Res.* 2009. Vol. 48 p.3526-3532. <http://dx.doi.org/10.1021/ie8014796>
- [5] Yanchen L., Hanchang S., Lan X. et al. "Study of operational conditions of simultaneous nitrification and denitrification in a Carrousel oxidation ditch for domestic wastewater treatment" *Biosour. Technol.* 2010 Vol. 101 (3) p. 901-996. <http://dx.doi.org/10.1016/j.biortech.2009.09.015>. PMID:19818603
- [6] Martín de la Vega P. T., Martínez de Salazar E., Jaramillo M. A., et al. "New contributions to the ORP & DO time profile characterization to improve biological nutrient removal" *Bioresource Technology.* 2012 Vol. 114 p.160-67. <http://dx.doi.org/10.1016/j.biortech.2012.03.039>. PMID:22483572
- [7] Hu Z., Wentzel M. C., Ekama G. A. "Anoxic growth of phosphate-accumulating organisms (PAOs) in biological nutrient removal activated sludge systems". *Water Research.* 2002 Vol. 36 (19) p.4927-4937. [http://dx.doi.org/10.1016/S0043-1354\(02\)00186-0](http://dx.doi.org/10.1016/S0043-1354(02)00186-0)
- [8] Aguado D., Montoya T., Borrás L., et al. "Using SOM and PCA for analyzing and interpreting data from a P-removal SBR". *Engineering Applications of Artificial Intelligence.* 2008 Vol. 21 p. 919-930. <http://dx.doi.org/10.1016/j.engappai.2007.08.001>
- [9] Guerrero J., Guisasola A., Baez, J. A. "The nature of the carbon source rules the competition between PAO and denitrifiers in systems for simultaneous biological nitrogen and phosphorus removal". *Water Research.* 2011 Vol. 45 p. 4793-4802. <http://dx.doi.org/10.1016/j.watres.2011.06.019> PMID:21774957
- [10] Fatone F., Bolzonella D., Battistoni P., et al. "Removal of nutrients and macropollutants treating low loaded wastewaters in a membrane bioreactor operating the automatic alternate-cycles process". *Desalination.* 2005 Vol. 35, p.395-405. <http://dx.doi.org/10.1016/j.desal.2005.02.055>
- [11] Paul, E., Plisson-Saune P. E., Mauret, S., et al. "Process state evaluation of alternating oxidic-anoxic activated sludge using ORP, pH and DO". *Water Science and Technology.* 1998 Vol. 38 (3) p. 299-306. [http://dx.doi.org/10.1016/S0273-1223\(98\)00469-7](http://dx.doi.org/10.1016/S0273-1223(98)00469-7)
- [12] Martins A. M. P., Heijnen J. J., van Loosdrecht M. C. M. "Effect of feeding pattern and storage on the sludge settleability under aerobic conditions". *Water Research.* 2003 Vol. 37 p. 2555-2570. [http://dx.doi.org/10.1016/S0043-1354\(03\)00070-8](http://dx.doi.org/10.1016/S0043-1354(03)00070-8)
- [13] Serralta, J., Ribes, J., Seco, A., et al. "A supervisory control system for optimizing nitrogen removal and aeration energy consumption in wastewater treatment plants". *Water Science and Technology.* 2002 Vol. 45 p.309-316. PMID:11936648
- [14] Universidad de Extremadura. *Procedimiento para controlar la aportación de oxígeno en sistemas biológicos*. Patente española. nº P200931106. 2012-3-08.
- [15] Martín de la Vega P., Larrea L., Rojas F. J. et al. *Manual de Gestión de EDAR. Depuración biológica de las aguas residuales urbanas. Problemática en sistemas de eliminación de nitrógeno*. Sevilla: GBS, 2012. ISBN: 978-84-615-5433-1.