

OPTIMITZACIÓ DEL RENDIMENT D'ELIMINACIÓ DE NITROGEN EN UNA EDAR URBANA MITJANÇANT LA REGULACIÓ DE L'APORTACIÓ D'AIRE

Mireia Fiter, Ignasi Rodríguez-Roda, Jesús Colprim i Manel Poch

Laboratori d'Enginyeria Química i Ambiental, Universitat de Girona, campus de Montilivi, s/n, 17071 Girona (Spain).

RESUM

En aquest treball s'ha optimitzat el rendiment d'eliminació biològica del nitrogen en una estació depuradora d'aigües residuals urbanes no dissenyada per eliminar nutrients. Estudis previs indicaven que la regulació del cabal d'aire podia resultar determinant a l'hora de garantir l'existència de zones aeròbics i anòxiques al reactor biològic, condició necessària perquè es produeixi el procés de nitrificació/desnitrificació. Aquesta regulació s'ha realitzat de manera manual, en funció de la monitorització de la concentració d'oxigen dissolt i el seguiment analític diari del nitrogen a l'efluent. Els resultats mostren que durant els set mesos de l'estudi els rendiments d'eliminació de nitrogen han estat elevats, abocant en tot moment per sota del límit legal.

RESUMEN

En este trabajo se ha optimizado el rendimiento de eliminación biológica del nitrógeno en una estación depuradora de aguas residuales urbanas no diseñada para eliminar nutrientes. Estudios previos indicaban que la regulación del caudal de aire podía resultar determinante para garantizar la existencia de zonas aerobias y anóxicas en el reactor biológico, condiciones necesarias para que se produzca el proceso de nitrificación/desnitrificación. Dicha regulación se ha realizado de manera manual, basada en la monitorización de la concentración de oxígeno disuelto y el seguimiento analítico diario del nitrógeno al efluente. Los resultados muestran que durante los siete meses que se ha realizado el estudio los rendimientos de eliminación de nitrógeno han sido elevados, vertiendo en todo momento por debajo del límite legal.

ABSTRACT

This paper shows the results of a seven-month study for optimizing the efficiency of the biological wastewater removal in an urban wastewater treatment plant. Previous studies in the facility, which was not designed to remove nutrients, indicated how important it was to regulate appropriately the air flow in the oxidation ditch. In order to guarantee a sequential aerobic/anoxic condition it was necessary to monitor the dissolved oxygen level in the bioreactor and to measure daily the effluent nitrogen concentration. Based on these values, the air flow was regulated manually.

Results show that the discharged nitrogen never surpassed the legal limit during the whole study.

Keywords: Biological nitrogen removal, control, instrumentation, nitrification, wastewater.

INTRODUCCIÓ

L'aplicació de la Directiva europea 91/271 de la CEE ha portat a la construcció d'un gran nombre d'estacions depuradores d'aigües residuals (EDAR) de tipus biològic. L'objectiu d'una EDAR és reduir els principals contaminants presents a les aigües residuals, amb la finalitat que la seva descàrrega final pugui ser assimilada pel medi receptor sense que això suposi cap impacte ambiental significatiu.

L'operació de les EDAR és especialment complexa per dues raons principals:

- La variabilitat de l'entrada a la planta, tant en quantitat com en qualitat, sense que això pugui ser controlat per l'operador de la planta. Aquesta variació no sols es produeix al llarg del dia sinó també segons el dia de la setmana i l'estació climatològica.
- La naturalesa de les reaccions és biològica. Això implica que la responsabilitat del tractament recau sobre una població multiespecífica d'éssers vius, interrelacionats per un gran nombre de variables.

La dificultat d'operar correctament una EDAR augmenta quan es pretén eliminar nitrogen biològicament. En aigües residuals urbanes aquest nitrogen es troba bàsicament en forma d'amoni i nitrogen orgànic (lligat a les proteïnes, als aminoàcids i a la urea). La seva eliminació en el reactor biològic es produeix en dues fases, una primera de nitrificació i una posterior de desnitrificació (N/D).

- Fase de nitrificació: en aquesta primera etapa l'amoni es transforma en nitrat en condicions aeròbiques, mitjançant l'acció dels bacteris nitrificants.
- Fase de desnitrificació: el nitrat produït en la primera etapa es converteix en nitrogen gas que s'escapa a l'atmosfera. Les condicions necessàries perquè es produeixi aquesta transformació són l'absència d'oxigen molecular lliure (condicions anòxiques) i la presència d'una font carbonosa, fàcilment biodegradable.

Una manera de fer front a la complexitat del procés portat a terme a les EDAR consisteix en la seva instrumentació amb sondes, les quals permeten conèixer les condicions d'operació i per tant optimitzar els rendiments d'eliminació. En una EDAR, les sondes són utilitzades bàsicament a tres nivells (Baeza, 1999):

1. Monitorització: es realitza el seguiment en continu dels principals paràmetres del procés.
2. Control per retroalimentació: a més del seguiment, es produeix una intervenció quan hi ha hagut una desviació del valor desitjat per tal de recuperar el funcionament correcte del procés.
3. Control anticipat: en aquest tipus de control s'analitza la pertorbació prèviament a l'entrada del sistema i es determina l'acció de control necessària per minimitzar el seu efecte abans que es produeixi.

La taula 1 llista les sondes existents per mesurar els diferents paràmetres del procés, el seu nivell d'implantació a l'Estat espanyol i la finalitat del seu ús en tractament d'aigües residuals urbanes (Jeppsson et al. 2001).

PARÀMETRE	ÚS	FINALITAT
Temperatura	+++	M
Conductivitat	++	M
pH	+++	M
Potencial redox	++	M
Pressió d'aire	++	M
Nivell d'aigua	++	M
Cabal d'aigua	+++	M, R, A
Cabal d'aire	+++	M, R
Oxigen dissolt	+++	M, R
Terbolesa	+++	M
Sòlids en suspensió total	++	M
Nivell de fangs	+	M
DBO (demanda biològica de O ₂)	+	M
DQO (demanda química de O ₂)	+	M
COT (carboni orgànic total)	+	M
Amoni	+	M
Nitrat	+	M
Fosfats	+	M
Respiració, activitat	+	M
Toxicitat	+	M

+: poc usat; ++: usat freqüentment; +++: usat amb normalitat

M: monitorització; R: control per retroalimentació; A: control anticipat.

Taula 1. Nivell d'instrumentació en el tractament d'aigües residuals urbanes a Espanya.

Tal com es pot apreciar, l'ús de sondes en el camp de les EDAR encara és prou limitat a l'Estat espanyol. És només excepcionalment, en el cas de les sondes de cabal d'aire i aigua i de concentració d'oxigen dissolt, que s'arriba a usar el senyal per fer el control. La situació és ben diferent al nord d'Europa, on l'ús de tot tipus de sensors amb la finalitat de fer control per retroalimentació i/o avançat és habitual (Jeppsson et al. 2001).

En EDAR on es requereix l'eliminació biològica de nitrogen, el procés es pot controlar eficaçment mitjançant la mesura en continu de la concentració d'amoni o de nitrats en el reactor de fangs actius. Això exigeix la instal·lació de sondes avançades i cares. Una alternativa per a les petites EDAR és el seguiment de paràmetres indi-

rectes del procés de N/D (com la concentració d'oxigen dissolt a les diferents zones del reactor, el potencial d'oxidoreducció, el pH o la temperatura), mitjançant sondes de més fàcil manteniment i sobretot més assequibles econòmicament.

El cas que es presenta en aquest article és el de l'optimització del procés de N/D en una EDAR real, no dissenyada per eliminar nutrients, però amb possibilitats d'aconseguir rendiments significatius. Aquesta optimització s'ha fet mitjançant la regulació del cabal d'aire, d'acord amb els registres resultants de la monitorització de la concentració d'oxigen dissolt. En un primer apartat es descriu el camp d'aplicació (les característiques físiques de l'EDAR i les condicions inicials d'operació) i a continuació s'explica la metodologia utilitzada en l'estudi. En un tercer punt s'exposen els resultats obtinguts de la monitorització i, finalment, es presenten les conclusions.

CAMP D'APLICACIÓ

L'EDAR on s'ha portat a terme l'estudi tracta l'aigua residual d'uns 15.000 habitants equivalents, amb un cabal mitjà de disseny de 3000 m³ al dia. El procés és de tipus biològic, amb un sistema de fangs actius d'aeració prolongada. Consta d'un desbast inicial (reixa de gruixuts i pou de sorres), bombament de capçalera, pretracament amb tamís, reactor de fangs actius i decantador secundari.

El reactor biològic és un carrousel d'oxidació. Aquests reactors es caracteritzen per la seva flexibilitat a l'hora de fixar diferents condicions d'operació al mateix tanc. L'aigua residual circula mecànicament al voltant d'un tanc ovalat a una certa velocitat per tal d'evitar la sedimentació de la biomassa en suspensió present. La circulació s'aconsegueix mitjançant la situació estratègica, a diferents punts del reactor, de rotors de tipus raspall que trenquen la superfície de l'aigua i aporten l'oxigen requerit pels microorganismes. Precisament, el fet que es puguin donar diferents zones d'operació permet pensar en aquest tipus de reactors a l'hora d'incloure processos que necessiten diferents etapes de reacció, com és el cas de la N/D.

El reactor té un volum màxim de 3.500 m³ i consta de quatre rotors disposats simètricament, de manera que es pot regular l'aportació d'aire a les diferents parts del carrousel. L'operació del procés és manual.

A l'inici de l'estudi, l'EDAR presentava rendiments satisfactoris d'eliminació de matèria orgànica i sòlids en suspensió. Per contra, les concentracions de nitrogen i fòsfor a l'efluent eren lleugerament superiors al límit legal d'abocament, ja que, tal com s'ha dit anteriorment, l'EDAR no va ser dissenyada per eliminar nutrients. No obstant això, semblava que els resultats de les analítiques portades a terme de forma rutinària, així com conclusions de campanyes experimentals prèvies (Llorens 2000), indicaven una certa capacitat d'eliminació biològica del nitrogen en determinats períodes de l'any.

Aquesta hipòtesi va ser contrastada per simulació, mitjançant el model núm. 1 pel reactor biològic (Henze et al. 1987) i el model de sedimentació en deu capes pel decantador secundari (Tákacs et al. 1991). Els resultats van evidenciar que una millor regulació de l'aire aportat al carrousel de l'EDAR permetria optimitzar els rendiments d'eliminació biològica del nitrogen (Llorens 2000).

METODOLOGIA

Sobre la base dels estudis anteriors de l'EDAR, la regulació de l'aire aportat sembla la clau per optimitzar el procés de N/D. Aquesta regulació, portada a terme fins aleshores de forma manual, solament és possible si es disposa de la mesura en temps real de la concentració d'oxigen dissolt a les diferents zones del carrousel. Per aquesta raó es va decidir instrumentar l'EDAR amb dues sondes d'oxigen dissolt (OD) al reactor biològic i un sistema d'adquisició dels senyals que ens permetés obtenir un registre digital en continu a l'ordinador que es comunica amb el panell de control.

La instal·lació de les sondes d'OD es va portar a terme a inicis d'estiu, amb l'objectiu d'arrencar el procés de N/D en les condicions més favorables pel creixement dels microorganismes nitrificants. La ubicació de les sondes es justifica d'acord amb els següents objectius (vegeu la figura 1):

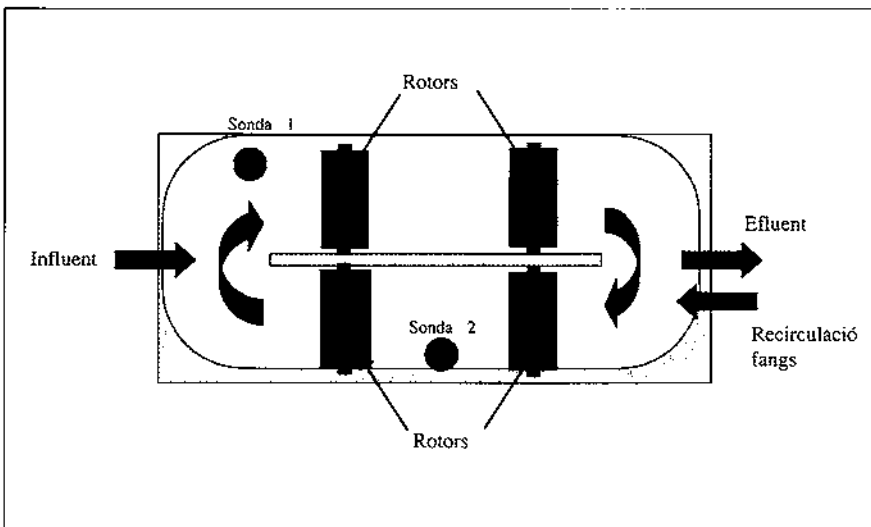


Figura 1. Disposició dels quatre rotors i localització de les dues sondes d'oxigen dissolt en el bioreactor.

- La primera sonda (OD₁) es va situar a la capçalera del carrousel, per tal de conèixer la concentració d'oxigen dissolt a la zona més favorable perquè es produeixi el procés de desnitrificació. A la capçalera es produeix la màxima càrrega de matèria orgànica (per tant hi ha suficient font de carboni fàcilment degradable), a més de ser la zona amb més requeriment d'oxigen i, per tant, on sembla més fàcil garantir condicions d'anòxia.
- La segona sonda (OD₂) es va instal·lar en un dels dos passadissos principals, concretament en el més allunyat de la sonda OD₁, zona que en principi es pretenia mantenir en unes condicions clarament aeròbiques per tal de potenciar la fase de nitrificació.

Amb la monitorització del senyal de les dues sondes es varen poder obtenir els registres diaris de la concentració d'oxigen dissolt a ambdues zones del carrousel. Amb l'estudi d'aquests registres es fixava la seqüència diària d'engegada i aturada dels quatre rotors existents a l'EDAR. Els criteris seguits per establir aquesta seqüència van respondre a les següents restriccions:

1. Minimització de la concentració de nitrogen total a l'efluent de l'EDAR, per la qual cosa no n'hi havia prou a potenciar la nitrificació, sinó que calia afavorir alhora la desnitrificació dels nitrats formats.
2. Per raons de manteniment s'havia d'igualar el nombre d'hores de funcionament i el nombre d'engegades i aturades dels quatre rotors.
3. Minimització del consum energètic.

Al llarg de l'estudi, es va fer un seguiment analític de la concentració d'amoni i de nitrats + nitrits (NO_x) d'una mostra integrada diària de l'efluent, per tal de poder relacionar les concentracions d'oxigen dissolt amb els rendiments del procés de N/D. Aquest seguiment es va portar a terme durant set mesos, des d'inicis de setembre fins a finals de març.

RESULTATS

La figura 2 mostra els resultats del seguiment analític de la concentració d'amoni i NO_x a l'efluent de l'EDAR al llarg de tot l'estudi. Es pot apreciar que en tot moment els rendiments d'eliminació de nitrogen han estat suficients per garantir un abocament amb concentracions de nitrogen sensiblement inferiors als 15 mg·l⁻¹ establerts per la legislació vigent. Al llarg de l'estudi, i en funció de les condicions d'operació, s'han produït llargs períodes on s'ha pogut optimitzar tot el procés de N/D, d'altres en els quals la nitrificació ha estat completa però no s'han pogut desnitrificar tots els nitrats formats, i finalment algun curt període en el qual no s'ha pogut nitrificar tot l'amoni de l'influent.

A inicis de setembre es treballa alternant diàriament dos rotors engegats en diagonal, 24 h/dia, fet que suposa un increment del 15% respecte del consum energètic de

la seqüència habitual. Aquest joc d'alternança diària és realitzat per tal que els quatre rotors treballin un nombre similar d'hores. S'observa una disminució progressiva de la concentració total de nitrogen a l'efluent, però la concentració d'amoni encara és significativa, fet que constata que la nitrificació encara no es produeix completament.

És per això que, a mitjan setembre, es realitza un augment de l'aportació d'oxigen mitjançant el funcionament d'un tercer rotor durant nou hores. A partir d'aquest increment d'aeració, es donen condicions favorables per una aclimatació progressiva de la població nitrificant, de manera que la concentració d'amoni baixa i alhora els nitrats formats poden desnitrificar-se completament. En conseqüència, s'estableix un llarg període (octubre, novembre i mitjan desembre) de condicions òptimes per al procés de N/D a l'EDAR, reflectit en el gràfic de la figura 2.

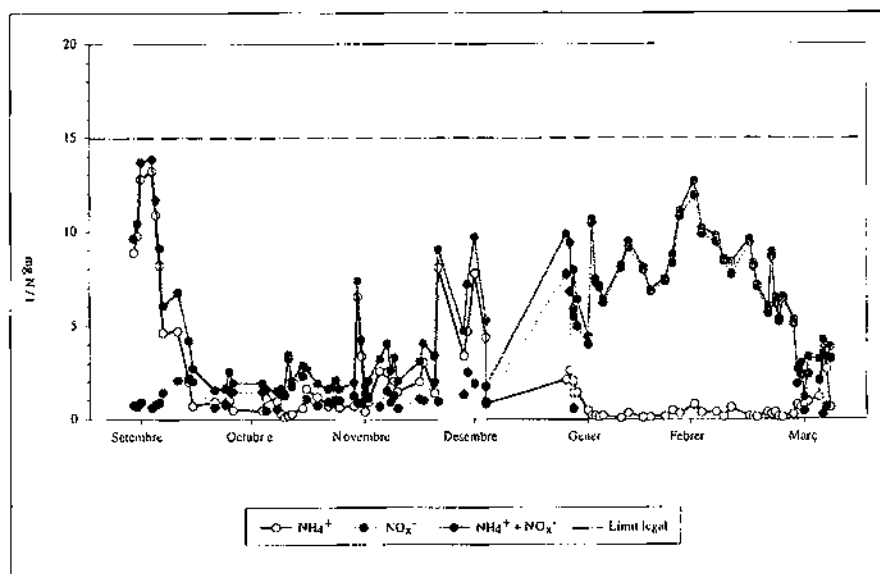


Figura 2. Gràfic que mostra la variació de la concentració d'amoni i nitrat durant el període d'estudi.

Durant aquest temps, s'obtenen perfils setmanals òptims d'OD amb una bona alternança de períodes aerobis i anòxics. Els nivells de la sonda 2 es troben entre 0 i 3-4 mg l⁻¹ i els valors de la sonda 1 són majoritàriament baixos, com mostra la figura 3.

A finals de desembre, es produeix un lleuger increment de la concentració d'amoni, tot i que les concentracions d'oxigen dissolt semblen les òptimes, cosa que fa pensar en una inhibició temporal de la capacitat de nitrificació al bioreactor deguda a

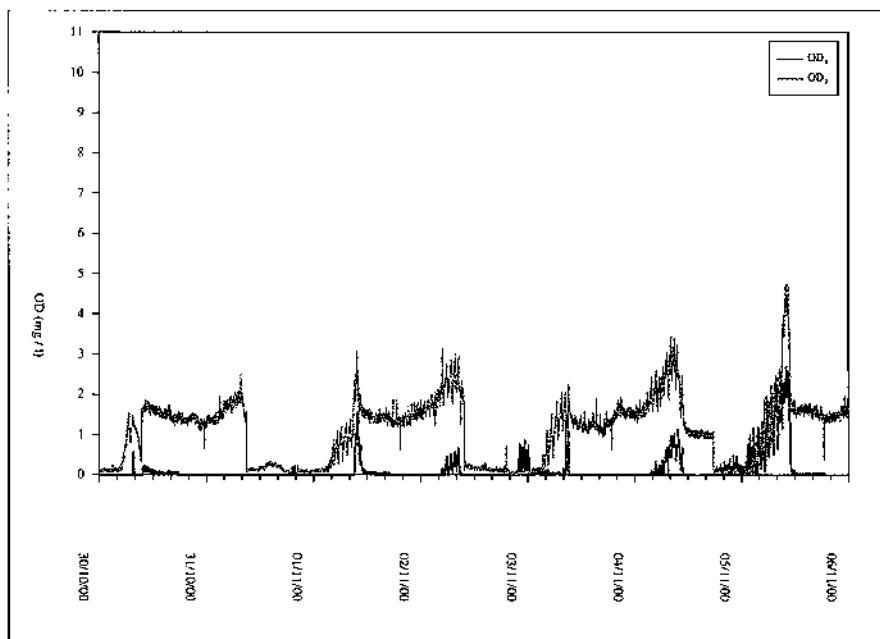


Figura 3. Perfil d'oxigen dissolt mesurat en continu al bioreactor amb les dues sondes durant la setmana del 30 d'octubre al 5 de novembre.

un abocament industrial incontrolat. Aquesta hipòtesi es veu reforçada pel fet que la normalitat es restableix ràpidament, i a finals de desembre la concentració d'amoni torna a disminuir, la qual cosa indica una bona nitrificació sense que s'hagi fet cap canvi en l'aportació d'oxigen al reactor.

A partir de gener hi ha un augment considerable de la concentració de NO_x^- . La nitrificació és manté però s'ha perdut parcialment la desnitrificació. Al mateix temps s'obtenen valors d'OD molt elevats en ambdues sondes, i fins i tot s'assoleixen valors de saturació en la sonda 2. Aquest fet s'aprecia clarament en la figura 4, on no s'observa una bona alternança de períodes d'anòxia amb d'altres d'aerobis. La manca de períodes d'anòxia és la causa de la baixa capacitat de desnitrificació.

A mitjan febrer es disminueix el temps de funcionament del tercer rotor de nou a cinc hores diàries, de manera que, a poc a poc, es va recuperant la fase d'anòxia al carrousel i s'afavoreix la recuperació de la desnitrificació (vegeu la figura 2), amb una disminució gradual de la concentració de nitrats a l'efluent. Per tant, a finals de l'estudi es torna a recuperar un bon rendiment de N/D i uns bons perfils setmanals d'OD, tal com es mostra a la figura 5.

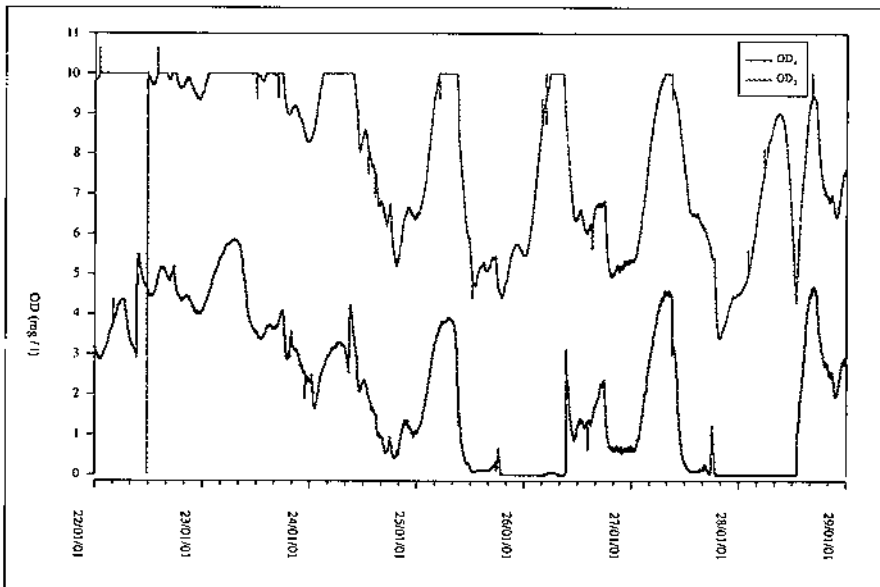


Figura 4. Perfil d'oxigen dissolt mesurat en continu al bioreactor amb les dues sondes durant la setmana del 22 al 28 de gener.

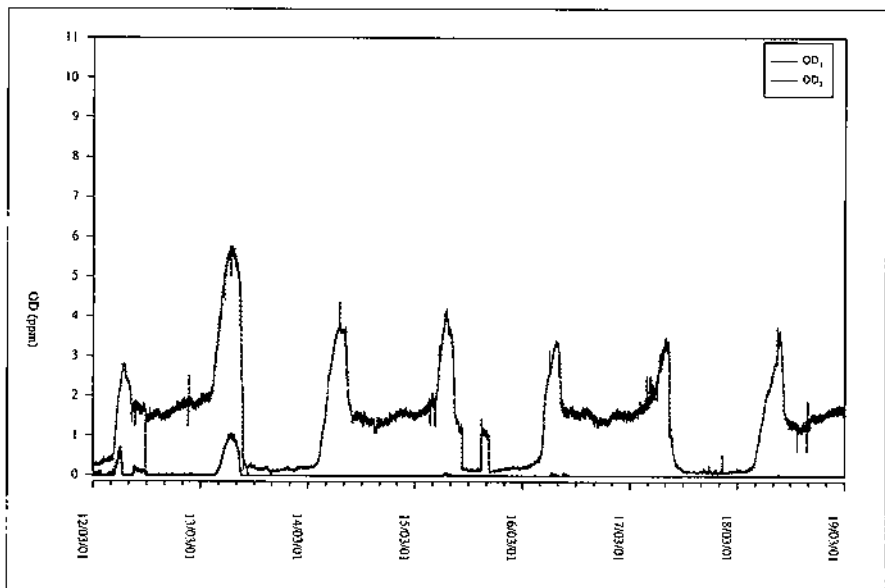


Figura 5. Perfil d'oxigen dissolt mesurat en continu al bioreactor amb les dues sondes durant la setmana del 12 al 18 de març.

CONCLUSIONS

- Queda demostrat que una EDAR real no dissenyada per eliminar nutrients, amb les característiques descrites en el present article, pot assolir bons rendiments d'eliminació de nitrogen. Durant el temps d'estudi s'han aconseguit sempre concentracions de nitrogen a l'efluent per sota del límit legal d'abocament (15 mg·l⁻¹), sense haver dut a terme cap tipus d'obra civil excepte la necessària per fer arribar el senyal de les sondes fins a l'ordinador de la caseta de control. A més, la nova estratègia d'operació de l'EDAR no ha modificat els rendiments d'eliminació de matèria orgànica ni la sedimentabilitat dels llots al decantador secundari que presentava la planta abans d'iniciar l'estudi.
- La monitorització de la concentració d'oxigen ha facilitat la regulació del cabal d'aire aportat al carrousel. D'aquesta manera s'ha controlat la concentració d'oxigen dissolt present al licor mescla i això ha afavorit el bon funcionament de les diferents poblacions de microorganismes desenvolupades.
- El cabal d'aire s'ha regulat modificant manualment la seqüència de funcionament de rotors. El següent pas en la millora del funcionament de l'EDAR podria ser automatitzar les operacions de canvi de seqüència, de manera que es podria passar de la monitorització a un control per retroalimentació.
- El seguiment realitzat d'OD permet afirmar que, per aconseguir un procés òptim de N/D en l'EDAR objecte d'estudi, és necessari alternar períodes anòxics i aerobis, obtenir valors en la sonda 2 entre 0 i 3-4 mg·l⁻¹ i valors en la sonda 1 més petits de 0.5 mg·l⁻¹ durant la majoria del temps.
- Els canvis de les hores de funcionament de rotors no han tingut una resposta immediata en els rendiments de N/D. Això és degut a la lenta dinàmica de resposta de la població nitrificant.
- Tot i que l'augment d'aeració respecte de les condicions d'operació anteriors a l'estudi comporta un increment de despesa energètica, en cap cas no s'ha superat un 30% d'excés de consum energètic.
- Amb el present estudi s'ha constatat que és possible optimitzar el procés de N/D mitjançant la monitorització de variables indirectes del procés, en aquest cas la concentració d'oxigen dissolt, abaratint els costos de la implementació, i sense que la fiabilitat disminueixi.

AGRAÏMENTS

Aquest treball ha estat finançat per l'Agència Catalana de l'Aigua i SEARSA (Societat d'Explotació d'Aigües Residuals, SA) dins el marc de l'estudi de la neces-

stat de reducció de nutrients a diverses estacions depuradores d'aigües residuals del Pla de Sanejament.

Bibliografia

- BAEZA LABAT, J. A. 1999. *Desarrollo e implementación de un sistema supervisor para la gestión y control de EDAR*. Tesi doctoral. Departament d'Enginyeria Química. Escola Tècnica Superior d'Enginyeries. Universitat Autònoma de Barcelona. Barcelona.
- BALAGUER, M. D., COLPRIM, J., MARTIN, M., POCH, M., RODRIGUEZ-RODA, I. 1998. *Tractament biològic d'aigües residuals urbanes*. Dins: Programa de Doctorat Tecnologies del Medi Ambient, Monografia núm. 1. Universitat de Girona. Girona
- HENZE, M., GRADY, C. P. L., GUIER, W., MARAIS, G. V. R., MATSUOT, T. 1987. *Activated Sludge Model N^o. 1, IAWPRC Scientific and Technical Report N^o 1*. IAWPRC. Londres. ISSN 1010-707X.
- JEPSSON, U., ALEX, J., PONS, M. N., SPANJERS, H., VANROLLEGHEM, P.A. 2001. *Status and future trends of ICA in wastewater treatment. A European perspective*. Proceedings of the 1st IWA Conference on Instrumentation, Control and Automation, Malmö (Suècia), 687-694.
- LLORENS I RIBES, E. 2000. *Estudi i optimització del procés d'eliminació biològica del nitrogen d'una EDAR del Baix Empordà*. Treball de recerca. Programa de Doctorat de Medi Ambient. Departament d'Enginyeria Química, Agrària i Tecnologia Agroalimentària. Laboratori d'Enginyeria Química i Ambiental. Universitat de Girona. Girona.
- TAKACS, I., PATRY, G. G., NOLASCO, D. 1991, A dynamic model of the clarification-thickening process. *Water Research*, 25 (10): 1263-1271.