

Optimización de EDAR mediante sistemas de control basados en sensores de pH, REDOX y oxígeno

María Victoria Ruano¹, Ángel Robles¹, Emèrita Jiménez², Marta Casao², Josep Ribes¹, Joaquín Serralta³, Aurora Seco¹, José Ferrer¹

¹Calagua – Unidad mixta UV-UPV, Departament d'Enginyeria Química, Universitat de València | www.calagua.webs.upv.es; www.uv.es/ingequim

²FCC Aqualia S.A. | www.aqualia.es ■ ³Calagua – Unidad mixta UV-UPV, IIAMA, Universitat Politècnica de València | www.iiama.upv.es



1. CONTROL DE LA ELIMINACIÓN DE NUTRIENTES EN EDAR

Los procesos biológicos implicados en la depuración de las aguas residuales incrementan considerablemente la complejidad y vulnerabilidad de operación de una EDAR y más aún en el contexto de unas exigencias de calidad del agua cada vez mayores bajo la necesidad de minimizar la producción de resi-

duos y el consumo energético. De este modo surge como un requisito imprescindible para la correcta explotación de una EDAR, la instrumentación, control y automatización (ICA) de los procesos de depuración (Olsson et al., 2007).

Actualmente la reducción del consumo energético de una estación depuradora de aguas residuales urbanas (EDAR) de aguas residuales urbanas (ARU) sigue siendo una preocupación constante, al igual que la necesidad de satisfacer los

cada vez más exigentes estándares de calidad de los efluentes tratados. Además, alcanzar elevados niveles de calidad del agua a partir de consumos energéticos reducidos permite disminuir no solo los costes de explotación de la instalación ambiental, sino también su impacto ambiental, asociado, por ejemplo, al agotamiento de recursos abióticos, emisiones de gases de efecto invernadero o eutrofización de masas de agua.

Los sistemas de control avanzado permiten satisfacer las crecientes exigencias de calidad del agua y minimizar la generación de residuos y el consumo de energía. Dos de las estrategias de control de mayor aceptación para reducir la demanda energética asociada a la aireación en procesos de eliminación son (Amand y Carlsson, 2012): (i) optimización de las consignas de oxígeno disuelto (*OD*) en sistemas aireados ininterrumpidamente, y (ii) optimización de la duración de los ciclos aerobios y anóxicos/anaerobios en sistemas aireados de forma intermitente.

Durante los últimos años, diversos estudios han considerado el uso de los perfiles temporales obtenidos a partir de la monitorización del potencial de oxidación-reducción (REDOX), pH y *OD* para el control del proceso de eliminación biológica de nitrógeno. Sin embargo, estos sensores se han aplicado generalmente para controlar el proceso de eliminación de nitrógeno en reactores discontinuos secuenciales aireados de forma intermitente (por ejemplo, Tanwar et al., 2008; Martín de la Vega et al., 2012). Por lo tanto, su aplicación a reactores aireados ininterrumpidamente precisa de una mayor validación a escala industrial.

En lo que respecta a reactores aireados ininterrumpidamente, una atractiva alternativa para minimizar la demanda energética asociada a la aireación en las EDAR para la eliminación biológica de nutrientes es la eliminación de nitrógeno a partir del proceso de nitrificación-desnitrificación simultánea (NDS), mediante el establecimiento de concentraciones de oxígeno disuelto reducidas en el sistema (Liu et al., 2010). Además, la NDS representa un enfoque interesante para las EDAR existentes no diseñadas inicialmente para la eliminación de N, ya que no se requieren unidades de tratamiento (por ejemplo, tanque de desnitrificación) y/o equipos adicionales (por ejemplo, bombas de recirculación interna).

El objetivo de este estudio fue validar diferentes estrategias de control avanzado a escala industrial, implementadas a través del software LoDif BioControl® (Ferrer et al., 2011). LoDif BioControl® incorpora tres tipos de estrategias de control para optimizar la eliminación biológica de nitrógeno bajo la mínima demanda energética posible asociada al proceso de aireación. La selección de la estrategia de control adecuada depende de la configuración de la EDAR, e.g. reactor continuo de tanque agitado (RCTA) y reactor de flujo en pistón (RFP) continuamente aireados o aireados de forma intermitente. Dichas estrategias de control se basan en la teoría de lógica difusa y utilizan como entradas los perfiles temporales obtenidos a partir de la monitorización del potencial REDOX, pH y *OD*. Dichas estrategias han sido implementadas en diversas EDAR.

2. DESCRIPCIÓN DE LOS SISTEMAS DE CONTROL

La implementación de los sistemas de control presentados en este artículo se ha llevado a cabo mediante el uso de la aplicación LoDif BioControl®. LoDif BioControl® representa una plataforma informática que permite la implementación de sistemas de control en EDAR de forma sencilla y guiada, otorgando además un elevado grado de flexibilidad que permite la introducción de cambios en la configuración y la incorporación de nuevos controladores.

LoDif BioControl® consiste en un software configurable que integra diferentes sistemas de control orientados a optimizar los principales procesos de una EDAR, mejorando el rendimiento del proceso y reduciendo los costes de operación asociados. Los principios que guían su desarrollo son la facilidad



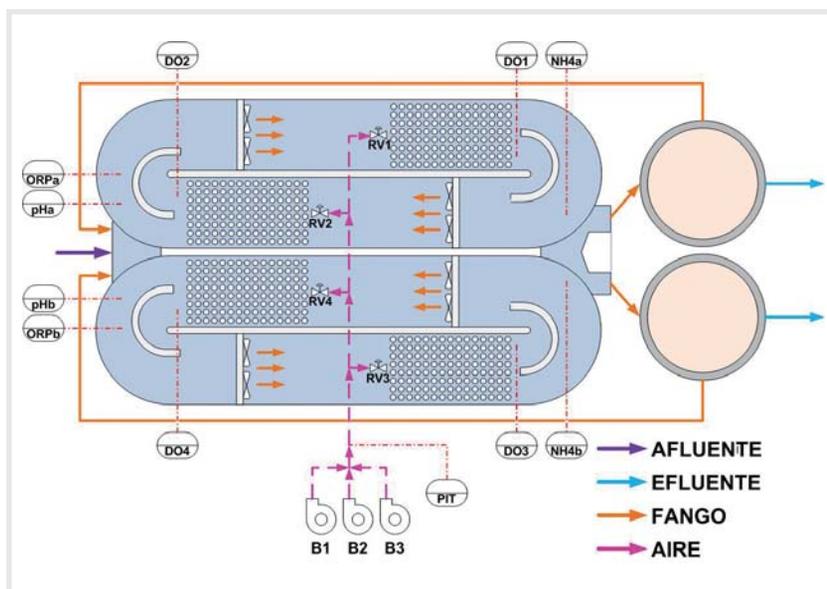


Figura 1. Diagrama de flujo del proceso biológico de la EDAR #1. PIT: captor de presión; DO: sensor de oxígeno disuelto; ORP: sensor de potencial de oxidación-reducción; B: soplante; RV: válvula de regulación; NH4: sensor de amonio.

de uso, la flexibilidad para permitir una configuración guiada de diferentes estrategias de control de acuerdo con las características de la EDAR y la estandarización para facilitar y/o permitir la implementación de los algoritmos de control en cualquier tipo de EDAR y configuración de la planta.

De los algoritmos de control incorporados en el software, en este trabajo se describen los siguientes (implementados en las EDAR):

- Sistema de control de la aireación
- Control del proceso de eliminación de nitrógeno sistemas RCTA continuamente aireados.
- Control del proceso de eliminación de nitrógeno sistemas RCTA aireados intermitentemente.

El sistema básico de control de la aireación es especialmente útil cuando se definen varios controladores de *OD* en el mismo sistema de fangos activados, o en diferentes reactores con equi-

Tabla 1. Principales características del agua residual tratada en la EDAR #1 durante el periodo de implementación y validación del sistema de control

Parámetro (mg/L)	Media ± DS
NH ₄	47.9 ± 9.3
NO ₃	3.0 ± 1.6
NO ₂	0.7 ± 0.7
NT	79.2 ± 23.4
NTK	75.6 ± 23.6
DQO	680 ± 86
DBO	388 ± 50

pos de aireación comunes. Permite mantener diferentes concentraciones de *OD* en las zonas de aireación regulable del reactor mientras se mantiene la presión de suministro de aire al mínimo. Este controlador basado en lógica difusa consiste en: i) un número determinado de controladores de *OD* que controlan la concentración de *OD* manipulando la correspondiente válvula de control; un sistema de control de la presión cuyo objetivo es mantener la presión de descarga de aire en el sistema en un valor deseado mediante el ajuste

del aire suministrado al sistema modificando el número de equipos en funcionamiento y su punto de funcionamiento; y un control supervisor que determina la consigna de presión de aire que debe mantenerse para minimizar el consumo de energía (Ruano et al., 2013). La combinación del sistema básico de aireación y los diferentes controladores de eliminación de nutrientes permite optimizar el proceso maximizando el ahorro de energía.

La estrategia de control para la eliminación de nitrógeno en RCTA continuamente aireados consiste en una estructura de control MISO (Multiple-Input-Single-Output) donde los parámetros de control son los perfiles temporales obtenidos a partir de la monitorización del potencial REDOX y del pH, y la variable manipulada es la consigna de *OD* en las diferentes zonas aireadas. Por lo tanto, el objetivo de esta estrategia de control es la optimización del *OD* en el sistema. En concreto, el controlador determina la variación de la consigna de *OD* (ΔOD_C) en función de cuatro entradas: la pendiente de pH y REDOX (dpH/dt y

$dORP/dt$, respectivamente) y la acumulación de la pendiente de pH y REDOX ($\sum dpH/dt$ y $\sum dORP/dt$, respectivamente).

La estrategia de control para la eliminación de nutrientes en RCTA aireados de forma intermitente consta de dos controladores diferenciales basados en lógica difusa cuyo objetivo es optimizar la duración de los ciclos aerobios y anóxicos/anaerobios del sistema. El controlador de la duración de los ciclos aerobios consiste en una estructura de control MISO donde los parámetros de control son los perfiles temporales obtenidos a partir de la monitorización del potencial REDOX y del pH, y la variable manipulada es la duración del ciclo aireado. El controlador de la duración de los ciclos anóxicos también consiste en una estructura de control MISO donde los parámetros de control son los perfiles temporales obtenidos a partir de la monitorización del potencial REDOX y del pH, y la variable manipulada es la duración del ciclo anóxico. Concretamente, el controlador de la duración del ciclo aireado determina la variación de la longitud del periodo ($\Delta t_{aerobio}$) en base a tres entradas: la primera y segunda derivada del pH (dpH/dt y d^2pH/d^2t , respectivamente) y la primera derivada del REDOX ($dORP/dt$). Para la fase no aireada, el controlador MISO determina la variación de la longitud del periodo ($\Delta t_{anóxico}$) en base a dos entradas: la segunda derivada del pH (d^2pH/d^2t) y la segunda derivada del ORP (d^2ORP/d^2t).

3. IMPLEMENTACIÓN Y VALIDACIÓN A ESCALA INDUSTRIAL

3.1. EDAR #1

La EDAR #1 es un ejemplo de implementación de sistemas de control para la eliminación de nitrógeno en sistemas RCTA continuamente aireados. El reactor biológico consiste en dos canales de

Soluciones Integrales Para Tratamiento De Aguas Comprehensive Water Treatment Solutions



Técnicas de
Desalinización de Aguas, SA

OFICINAS CENTRALES
Cardenal Marcelo Spinola, 10
28016 - Madrid (SPAIN)
Tif.: (+34) 914 569 500
E-mail: tedagua@tedagua.com

www.tedagua.com

oxidación con una capacidad de tratamiento de aprox. 5900 m³/d que trata ARU con cierto componente industrial. La Figura 1 muestra el diagrama de flujo de dicho proceso junto a la instrumentación implementada. La Tabla 1 muestra las características promedio del ARU tratada durante el periodo de implementación y validación del sistema de control.

La Figura 2a muestra un ejemplo de funcionamiento del sistema de control de nitrógeno durante tres días de operación. Esta figura ilustra cómo el sistema de control implementado en la EDAR #1 modifica las consignas de OD (OD_C) en función del pH y REDOX. En particular, cuando el perfil de pH aumenta y el perfil de REDOX disminuye (relacionado con un aumento en el grado de nitrificación y en la carga afluente al sistema, respectivamente), el sistema de control tiende a incrementar la consigna de OD. Por ejemplo, se observa un pico de carga afluente el día 26 al mediodía, lo que se ilustra mediante una fuerte disminución del REDOX y una considerable disminución del pH. En consecuencia, el sistema de control aumentó la consigna de OD. Como muestra la Figura 2a, la concentración de amonio se mantuvo en valores reducidos durante todo el periodo.

La Figura 2b muestra la reducción del consumo energético (expresado como % kWh / kg DQO_{ELIMINADA}) resultante de la implementación del sistema de control en la EDAR. Como muestra esta figura, la demanda energética se redujo considerablemente como resultado de operación del controlador. La implementación del sistema de control de la aireación resultó en un ahorro en el consumo de energía general de la planta del 20% expresado como kWh por kg de DQO equivalente eliminada (incluida la eliminación de amonio), mientras que la implementación del sistema de control de nitrógeno supuso un ahorro energético adicional del 12%. Por otro lado, se alcanzaron eficacias de eliminación de DQO y de nitrógeno adecuadas.

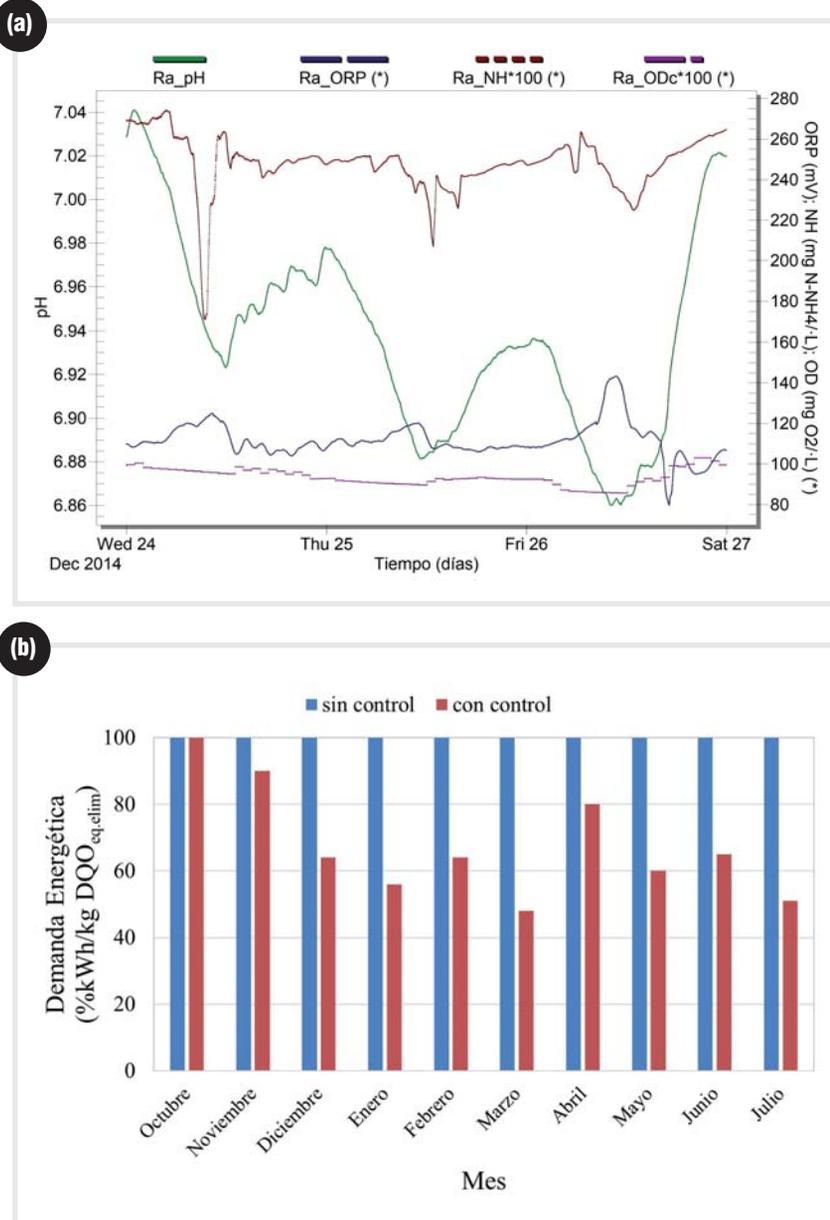


Figura 2. Comportamiento del sistema de control. (A) Evolución de: (—) pH, (—) ORP, (—) NH₄ (x100) y (—) OD_C (x100). (B) Ahorro de energía de la EDAR después de implementar el controlador propuesto: (—) anterior a la implementación del controlador y (—) posterior a la implementación del controlador

3.2. EDAR #2

La EDAR #2 es un ejemplo de implementación de sistemas de control para la eliminación de nitrógeno en sistemas RCTA aireados intermitentemente. En

este caso, la estrategia de control tiene por objetivo optimizar la duración de las fases aerobia / anóxica / anaerobia en función de los datos obtenidos de diferentes sondas de bajo coste. El reactor biológico consiste en dos canales de oxidación con una capacidad de tratamiento de aprox. 3500 m³/d que trata ARU. La Figura 3 muestra el diagrama de flujo de dicho proceso junto a la ins-

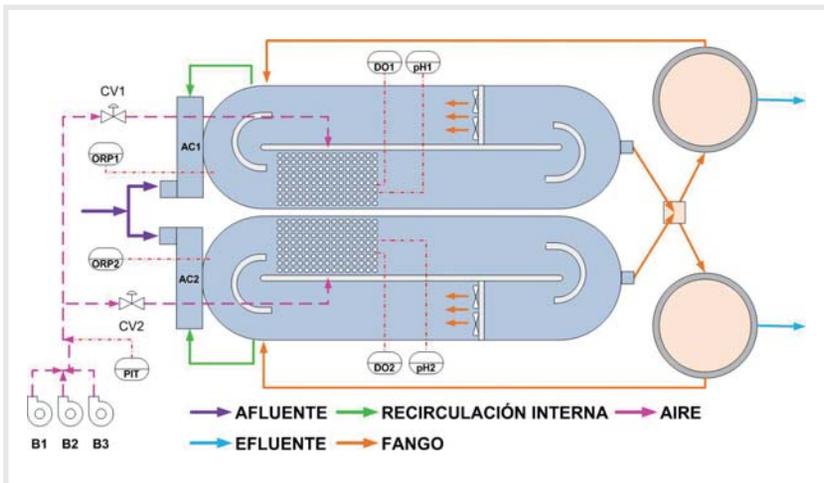


Figura 3. Diagrama de flujo del proceso biológico de la EDAR #2. PIT: captor de presión; DO: sensor de oxígeno disuelto; ORP: sensor de potencial de oxidación-reducción; B: soplante; CV: válvula de control; AC: cámara anaerobia

trumentación implementada. La Tabla 2 muestra las características promedio del ARU tratada durante el periodo de implementación y validación del sistema de control.

En la EDAR #2 se implementó un sistema de control de la aireación que distribuye el aire suministrado a los dos reactores modificando el grado de apertura de las válvulas de control para mantener concentraciones similares de OD en ambos reactores.

La Figura 4a muestra un ejemplo de funcionamiento del sistema de control implementado en la EDAR #2. En esta depuradora la dinámica de entrada del ARU tiende a seguir un patrón diario, como ilustra el perfil de OD mostrado en la Figura 4a. La mayor carga afluyente se registra generalmente del mediodía al final de la tarde. Por ejemplo, un pico de carga afluyente moderada (DQO y nitrógeno) se puede observar el primer día a las 18 horas. Bajo estas condiciones, el controlador de la duración de la fase aireada aumenta gradualmente la duración de dicha fase hasta alcanzar su límite máximo (establecido en 200 min). Durante esta fase, en comparación con otras fases aerobias, el perfil de pH ilustra una fuerte caída, principalmente como con-

Tabla 2. Principales características del agua residual tratada en la EDAR #2 durante el periodo de implementación y validación del sistema de control	
Parámetro (mg/L)	Media ± DS
NH ₄	6.7 ± 3.8
TKN	7.5 ± 4.2
COD	103 ± 34
BOD	47 ± 25

secuencia de un elevado grado de nitrificación. Con respecto al controlador de la duración de la fase no aireada, durante este ciclo la duración del mismo aumentó hasta alcanzar el máximo



límite establecido. El perfil de pH inicialmente aumenta mostrando un mayor grado de desnitrificación y finalmente permanece aproximadamente constante (bajo grado de desnitrificación), mientras que el perfil de REDOX indica una disminución moderada.

La Figura 2b muestra la reducción del consumo energético (expresado como % kWh/kg DQO_{ELIMINADA}) resultante de la implementación del sistema de control en la EDAR. Como muestra esta figura, la demanda energética se redujo considerablemente como resultado de operación del controlador. En concreto, la demanda energética se redujo en torno a un 29%. Por otro lado, se aumentó la eficiencia de eliminación de DQO y de nitrógeno.

3.3. EDAR #3

La EDAR #3 es otro ejemplo de implementación de sistemas de control para la eliminación de nitrógeno en sistemas RCTA aireados intermitentemente, similar a la EDAR #2. Por tanto, también en este caso, la estrategia de control tiene por objetivo optimizar la duración de las fases aerobia / anóxica / anaerobia en función de los datos obtenidos de diferentes sondas de bajo coste. La EDAR #3 consiste en tres canales de oxidación que trabajan en paralelo. Durante la fase aerobia,

las válvulas de control se modifican para obtener la misma concentración de OD en los reactores. El consumo de energía también se redujo significativamente. En concreto, la demanda energética del sistema de fangos activados se redujo en un 46%, medida como kWh/d. Además, la autonomía y automatización de la planta se vio significativamente incrementada, siendo esto uno de los principales objetivos de la implementación.

4. CONCLUSIONES

Las estrategias de control implementadas no sólo redujeron la demanda energética de las instalaciones afectadas, sino que también permitieron alcanzar los estándares de calidad establecidos para el efluente. Por tanto, además de facilitar la operación de las instalaciones, los requerimientos energéticos se redujeron hasta en un 46%.

Cabe destacar que la herramienta LoDif BioControl® no sólo facilita y flexibiliza la operación de la EDAR, en tanto que diferentes estrategias de control pueden ser implementadas sin necesidad de modificar el SCADA de la EDAR, sino que también supone una mejora en el funcionamiento y la estabilidad del proceso y una reducción de los costes de operación

REFERENCIAS Y BIBLIOGRAFÍA

Åmand, L. and Carlsson, B. (2012). Optimal aeration control in a nitrifying activated sludge process. *Water Res.* 46, 2101-2110.

Ferrer J., Seco A., Ruano M.V., Ribes J., Serralta J., Gómez T., Robles A. (2011). LoDif BioControl® control software, intellectual property. Main Institution: Universitat de València; Universitat Politècnica de València.

Olsson, G., Nielsen, M.K., Yuan, Z. (2007) *Instrumentation, Control and Automation in Wastewater Systems*, 1 edition. ed. IWA Publishing, London

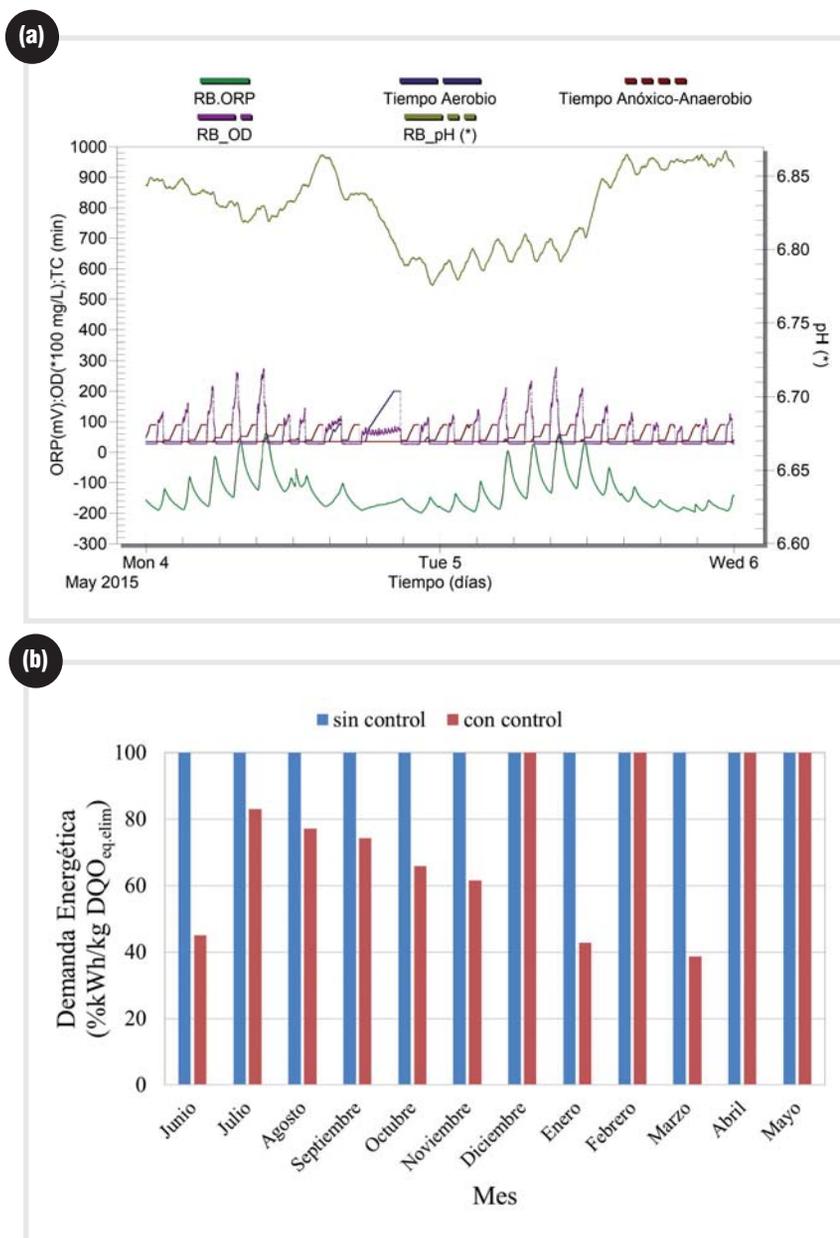


Figura 4. Comportamiento del sistema de control. (A) Evolución de: (—) ORP, (—) duración del periodo aireado, (---) duración del periodo no aireado, (—) DO, y (—) pH. (B) Ahorro de energía de la EDAR después de implementar el control avanzado propuesto: (■) anterior a la implementación del controlador y (■) posterior a la implementación del controlador

Liu, Y., Shi, H., Xia, L., Shi, H., Shen, T., Wang, Z., Wang, G. and Wang, Y. (2010) Study of operational conditions of simultaneous nitrification and denitrification in a Carousel oxidation ditch for domestic wastewater treatment. *Bioresour. Technol.* 101, 901-906.

Martín de la Vega, P.T., Martínez de Salazar, E., Jaramillo, M.A. and Cros J. (2012) New contributions to the ORP & DO time profile characterization to improve biological nutrient removal. *Bioresour. Technol.* 114, 160-167.

Ruano, M.V., Serralta, J., Ribes, J., Seco, A. and Ferrer J. (2013) Combination of cascade fuzzy controllers with a supervisory expert system for controlling aeration in WWTPs. Application to several WWTPs. In proceedings of the 11th IWA conference on instrumentation control and automation

Tanwar, P., Nandy, T., Ukeya, P. and Manekara, P. (2008) Correlating on-line monitoring parameters, pH, DO and ORP with nutrient removal in an intermittent cyclic process bioreactor system. *Bioresour. Technol.* 99, 7630-7635.