

Optimización de la eliminación de P en una EDAR mediante el empleo de un software de modelización del funcionamiento de la planta (BioWin).

Verde, R^{a1}. Casas, O^{a2}. Muiño, P^b. y Poncet, J^c

^a Adantia, S.L. Edif. Área Central, 1ª planta, L 32-K (Fontiñas), 15707 Santiago de Compostela r.verde@adantia.es ^(a1), o.casas@adantia.es ^(a2)

^b Estudiante Máster Ingeniería Ambiental, ETS de Ingeniería de la USC, Rúa López de Marzoa s/n, Campus Sur paula.muino.parente@rai.usc.es

^c E.P.E. Augas de Galicia. Dr. Maceira 18 Bajo, 15706 Santiago de Compostela. judith.poncet@xunta.gal.

Línea temática C | Agua y ciudad

RESUMEN

En el presente trabajo se hace un análisis del proceso depurativo de una EDAR urbana gallega de tipo biológico y con un tratamiento de eliminación biológica conjunta de nutrientes. El objetivo principal de este estudio es verificar de forma teórica si es posible mejorar la calidad del efluente, en particular de las concentraciones de fósforo, ya que puntualmente son superiores a la impuesta en la Autorización de Vertido. Para ello se emplea el software de modelización BioWin (5.1). Con este programa se crea un modelo de la planta en base a los datos disponibles. Una vez calibrado y validado el modelo, se habrá conseguido reproducir el comportamiento real de la EDAR y se procederá al análisis de su respuesta frente a la variación de diversos factores clave en el rendimiento del proceso depurativo. En el caso particular de esta planta, que da servicio a una población de 20 000 habitantes equivalentes y caudal medio de diseño de 5 000 m³/d, fue necesaria la ejecución de dos modelos distintos en base a la configuración bajo la que trabajasen los dos tanques de aireación de que dispone la planta tras el selector anaerobio: como doble canal de reacción en paralelo o como doble canal de reacción – decantación.

Palabras clave | Modelización; eliminación biológica de fósforo; biowin; nutrientes

INTRODUCCIÓN

En el marco de los trabajos de “*Asistencia técnica ao control e asesoramento á explotación das instalacións de depuración de augas residuais de Galicia (OH.388.346.SV)*” se decidió modelizar el funcionamiento de una EDAR que presentaba problemas para eliminar fósforo mediante el tratamiento biológico, llegando en ocasiones (fundamentalmente en época estival) a superar los límites establecidos en la autorización de vertido para ese parámetro (2 mg/l). Por este motivo se hace necesario el empleo del proceso de precipitación química del fósforo mediante dosificación de cloruro férrico.

Con este trabajo se pretende determinar teóricamente unas pautas de operación idóneas que permitan garantizar el cumplimiento de los límites exigidos para fósforo en el efluente sin emplear el tratamiento químico y sin penalizar el resto de parámetros del vertido.

Indicar que no se indica en ningún punto de la comunicación el nombre de la instalación a la que hace referencia este trabajo para cumplir con las exigencias de confidencialidad de los datos tanto de Augas de Galicia como del titular de la planta.

MATERIAL Y MÉTODOS

La EDAR elegida es una planta de depuración biológica, en modalidad de aireación prolongada y eliminación conjunta de nitrógeno y fósforo por vía biológica, con apoyo de cloruro férrico en caso de ser necesario, y desinfección mediante radiación ultravioleta. La deshidratación de los fangos se produce mediante tambor espesador y centrífuga.

La planta da servicio a una población de diseño de 20.000 habitantes equivalentes, con un caudal medio de 5.000 m³/d (208 m³/h) y caudal punta de 500 m³/h.

Ya que las condiciones y supuestos de diseño bajo las que se proyectó la planta difieren de las actuales condiciones de funcionamiento, resulta interesante analizar el funcionamiento real de la misma, para lo cual se emplea el software de modelización BioWin (versión 5.1). Con este programa se crea un modelo de la planta en base a los datos de caudal (de agua y fangos) registrados, cargas contaminantes del influente y el efluente, y demás datos de las instalaciones construidas y equipos instalados. Una vez calibrado y validado el modelo, se habrá conseguido reproducir el comportamiento real de la EDAR y se procederá al análisis de su respuesta frente a la variación de diversos factores clave en el rendimiento del proceso depurativo.

Descripción de la EDAR objeto de estudio

La línea de aguas está compuesta por las etapas de pretratamiento, tratamiento secundario y tratamiento terciario o avanzado (eliminación de nutrientes y desinfección). Los procesos que las componen son el desbaste, el desarenado - desengrasado, el tratamiento biológico constituido por un selector anaerobio, dos tanques de aireación (canales de oxidación) mediante rotores y un decantador secundario; y la desinfección. A priori el proceso de precipitación química del fósforo no será necesario, aunque la planta cuenta con el equipo oportuno para ello.

La EDAR fue diseñada para poder trabajar con los tanques de aireación bajo tres configuraciones distintas: como doble canal de aireación, en serie o en paralelo, y decantador secundario; o como doble canal de reacción – decantación con o sin decantador secundario (prescindible). Esto se consigue gracias a la instalación de un distribuidor o cámara de reparto motorizada previa a los tanques de aireación, así como la instalación de vertederos de altura variable mecánicamente y la existencia de una comunicación entre los tanques. En las siguientes tablas (tabla 1, tabla 2 y tabla 3) se indican las dimensiones y parámetros de funcionamiento especificados en el proyecto de la EDAR.

Tabla 1 | Configuración de diseño del tanque anaerobio

SELECTOR ANAEROBIO		
Nº UNIDADES	1	Ud
LONGITUD	16	m
ANCHO	8	m
ALTURA EFECTIVA	4	m
VOLUMEN EFECTIVO	500	m ³
TIEMPO DE RETENCIÓN HIDRÁULICA	24,83	h
TIEMPO DE FERMENTACIÓN	2,40	h

Tabla 2 | Dimensiones y características de diseño de los dos tanques de aireación existentes

TANQUES DE AIREACIÓN		
Nº UNIDADES	2	Ud
ANCHURA TOTAL (DE CADA TANQUE)	13,65	m
LONGITUD TOTAL (DE CADA TANQUE)	68,35	m
ALTURA EFECTIVA	3,3	m
SUPERFICIE UNITARIA	897	m ²
VOLUMEN UNITARIO	2 337	m ³
CARGA VOLUMÉTRICA	0,24	Kg DBO ₅ /m ³
CONTENIDO DE SS	3,50	Kg SS/m ³
CARGA MÁSCA (F/M)	0,069	Kg DBO/Kg SS
COEF. DE PRODUCCIÓN DE FANGOS	0,78	Kg SS/Kg DBO
PRODUCCIÓN FANGOS BIOLÓGICOS	975,00	Kg SS/d
PRODUCCIÓN FANGOS QUÍMICOS	0	Kg SS/d
FANGOS EN EXCESO	875,00	Kg SS/d
EDAD DE FANGOS	21	d
TIEMPO DE RETENCIÓN HIDRÁULICO	22,4	h

Tabla 1 | Dimensiones y datos operativos de diseño del decantador secundario

DECANTADOR SECUNDARIO		
Nº UNIDADES	1	Ud
DIÁMETRO EFECTIVO	26	m
ALTURA TOTAL EN BORDE	3,9	m
ALTURA MEDIA DE COTA DE AGUA	3,5	m
ALTURA TOTAL EN CENTRO DEL DECANTADOR	4,09	m
PENDIENTE SOLERA	5	%
SUPERFICIE TOTAL	530,93	m ²
VOLUMEN TOTAL	1 858,25	m ³
PERÍODO DE RETENCIÓN HIDRÁULICO A QMEDIO	8,92	h
PERÍODO DE RETENCIÓN HIDRÁULICO A QMÁXIMO	3,71	h
CARGA HIDRÁULICA EN LA SUPERFICIE A QMEDIO	0,39	m ³ /m ² /h
CARGA HIDRÁULICA EN LA SUPERFICIE A QMÁXIMO	0,94	m ³ /m ² /h
CARGA HIDRÁULICA EN VERTEDERO A QMEDIO	2,55	m ³ /h/m
CARGA HIDRÁULICA EN VERTEDERO A QMÁXIMO	6,12	m ³ /h/m
CARGA SUPERFICIAL DE SÓLIDOS A QMEDIO	1,37	Kg SS/m ² · h
CARGA SUPERFICIAL DE SÓLIDOS A QMÁXIMO	3,30	Kg SS/m ² · h

Configuración del tratamiento biológico

En la anterior descripción de la EDAR se indica que los dos tanques de aireación pueden funcionar bajo tres configuraciones distintas. A continuación, se muestra esquemáticamente en qué consisten cada una de ellas.

- Doble canal de reacción en serie con decantador secundario

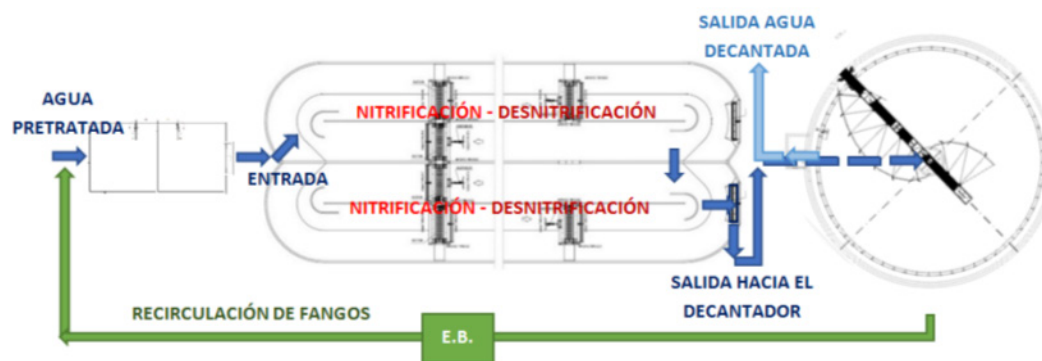


Figura 1 | Esquema de funcionamiento de los tanques como reactores biológicos en serie

En esta configuración la entrada del afluente se produce en uno de los reactores y la salida hacia decantación a través del contrario siendo clave la comunicación entre ambos tanques para el trasvase del licor mezcla de uno a otro. En este caso se produce dos veces a un proceso de nitrificación – desnitrificación, uno en cada tanque. Posteriormente las aguas son tratadas en el decantador secundario, desde el cual se produce la recirculación de los fangos al selector anaerobio. Durante el período de estudio la EDAR no trabajó en ningún momento con esta configuración.

- Doble canal de reacción en paralelo con decantador secundario

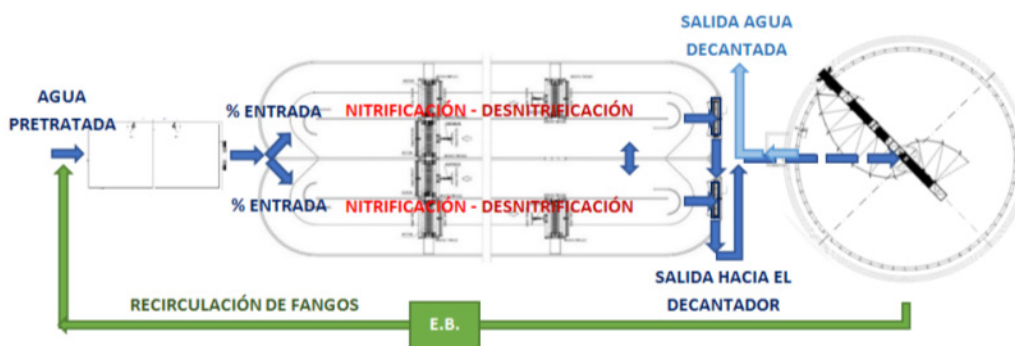


Figura 2 | Esquema de funcionamiento de los tanques como reactores biológicos en paralelo

De nuevo los tanques trabajan sólo como reactores biológicos. En este caso se permite la entrada y salida de agua en ambos, produciéndose el paso del licor mezcla de un tanque a otro de forma inevitable a través del orificio de comunicación que carece de compuerta. Las etapas del proceso de nitrificación – desnitrificación no tienen por qué producirse al mismo tiempo en ambos tanques, incluso es aconsejable lo contrario, pues de esta forma el equipo de aireación (los rotores) no entra en funcionamiento simultáneamente en ambos y el pico de potencia consumida por la EDAR es menor. Las aguas son tratadas en el decantador secundario y la recirculación de los fangos se produce desde el mismo.

La EDAR trabajó con esta configuración entre los meses de julio a noviembre de 2016. Las consignas de proceso en ese período son las siguientes. Los ciclos de nitrificación - desnitrificación con una duración de 90 min, con una distribución temporal del proceso de 60% – 40% (54 min. nitrificando y 36 min desnitrificando). Entre cada ciclo hay un periodo de 30 min durante los cuales se cierra la entrada y salida de agua en el tanque, buscando que se produzca un mínimo clarificado del agua, de tal forma que, al abrir el vertedero, no se produzca la salida excesiva del licor mezcla hacia el decantador secundario.

- Doble canal de reacción – decantación con o sin decantador secundario

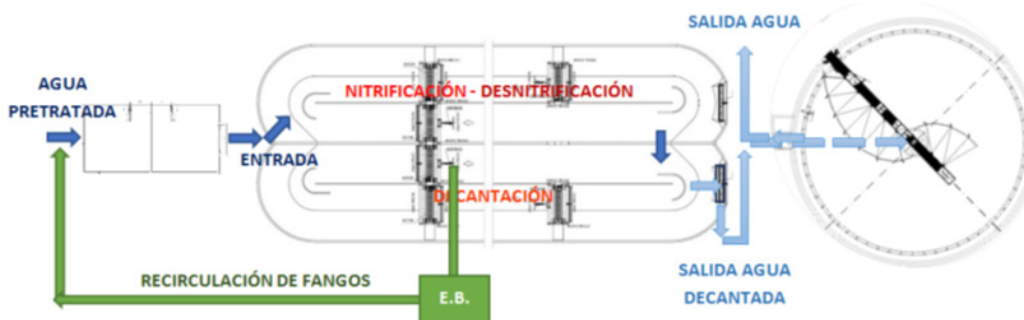


Figura 3 | Esquema de funcionamiento del tanque nº1 como reactor biológico y del tanque nº2 como decantador

Esta es la configuración habitual de trabajo de la planta. En ella cada tanque trabaja alternativamente como reactor biológico y como decantador, con lo que el agua que sale del tanque no tendría por qué ser derivada a un decantador secundario. En el caso de esta EDAR, al no existir una conducción que conecte directamente los tanques de aireación con el canal de desinfección, resulta inevitable que el agua atraviese el decantador secundario, el cual actúa como tanque de paso, donde la decantación es prácticamente inexistente. La recirculación de los fangos se produce desde los tanques de aireación, a través de dos conducciones que conectan cada tanque con la estación de bombeo.

Los ciclos de nitrificación – desnitrificación son de 210 min, de nuevo con una distribución temporal de 60% - 40% (nitrificación durante 126 min y desnitrificación durante 84 min). Durante la nitrificación y la desnitrificación el agua entra en el tanque en reacción (distribuidor abierto al 100% y vertedero cerrado) y se deriva hacia el tanque en decantación (distribuidor V Jornadas de Ingeniería del Agua. 24-26 de Octubre. A Coruña

cerrado y vertedero abierto al 100%) a través del orificio que comunica ambos tanques. Entre los ciclos de nitrificación – desnitrificación se produce una pausa de 30 min durante los cuales en el tanque en reacción se cierra la entrada y salida de caudal (distribuidor y vertedero cerrados), para que se produzca un mínimo clarificado, a la par que se abre la entrada y salida en el tanque contrario, en decantación.

Caudales y cargas afluentes

Las aguas residuales a tratar en esta planta son de carácter urbano. El núcleo al que da servicio la depuradora no cuenta con una red de saneamiento separativa, por lo que la composición de las aguas responde a la mezcla de las aguas residuales domésticas del núcleo poblacional, las industriales del polígono industrial conectado, las aguas de infiltración y las aguas de escorrentía.

El período de análisis se extiende desde de julio de 2014 a noviembre de 2016. En la figura 4 se muestran los caudales registrados en dicho período enfrentados a los datos de precipitaciones mensuales.

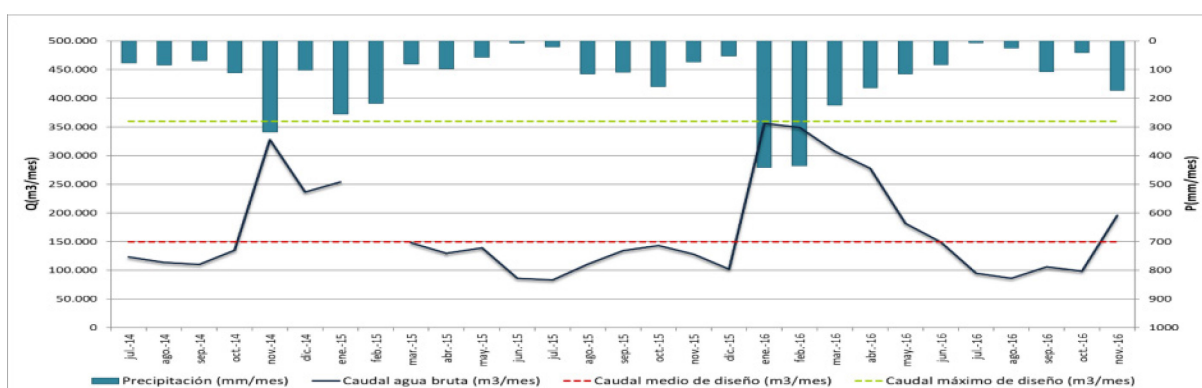


Figura 4 | Caudales de agua bruta (influyente)

Se observa una clara correlación entre las precipitaciones y el caudal entrante en la planta, lo que denota un problema grave de infiltraciones en la red de saneamiento a la que se conecta la depuradora. Esto implica la diferenciación de dos épocas distintas para el correcto análisis de la planta (en lo que a datos medios de influente y efluente se refiere): la época de lluvias abundantes, invierno, y la época de menos lluvias, verano. La razón por la que se hace esta diferenciación es que cabe esperar que la carga contaminante del influente sea menor en los meses de lluvias, al ser diluida en la red de saneamiento por las aguas de infiltración y escorrentía.

En lo siguiente, se considera como época de verano los meses de abril a septiembre (ambos inclusive) y como época de invierno los restantes.

Al incluir en la gráfica los caudales máximo y medio de diseño (12000 m³/h y 5000 m³/d respectivamente) de la EDAR, se observa claramente cómo se supera el caudal medio en la época de invierno.

Dicho esto, los valores medios de agua bruta con los que se trabaja en la modelización para las épocas indicadas y bajo las configuraciones comentadas son los recogidos en la tabla 4.

Tabla 4 | Caudales medios diarios empleados en la modelización

	CAUDAL MEDIO AGUA BRUTA (m³/d)	
	CANAL REACCIÓN – DECANTACIÓN	CANAL REACCIÓN EN PARALELO
VERANO	4.465	3.126
INVIERNO	7.378	4.817

Las muestras de agua bruta son recogidas en el pozo de bombeo de la EDAR mediante tomamuestras automático durante un período de 24 horas, en ellas se analiza el contenido de sólidos en suspensión (SST), la demanda biológica de oxígeno (DBO₅), la demanda bioquímica de oxígeno (DQO), el nitrógeno total Kjeldahl (NTK), el fósforo (P), la conductividad y el pH.

Se toman como referencia las analíticas mensuales efectuadas desde julio de 2014 a noviembre de 2016, una frecuencia de muestreo acorde a lo dispuesto en la Directiva 91/271/CEE según los habitantes equivalentes de diseño de la EDAR, que en el caso de esta planta serían 12 muestras anuales.

En la tabla 5 se muestran los valores medios calculados para cada uno de los parámetros, en cada época del año y según la configuración de trabajo de los tanques, frente a las concentraciones medias de los contaminantes consideradas en el diseño de la EDAR.

Se conoce que el funcionamiento de la EDAR hasta el mes de junio de 2016 (inclusive) fue bajo la configuración de doble canal reacción – decantación con decantador secundario, y en los meses siguientes como doble canal de reacción en paralelo y decantador secundario.

Tabla 5 | Concentraciones medias de los parámetros en agua bruta.

	ÉPOCA	SST (mg/l)	DBO ₅ (mg/l)	DQO (mg/l)	NTK (mg/l)	PT (mg/l)	pH	CONDUCTIVIDAD (μS/cm)
CANAL REACCIÓN – DECANTACIÓN	VERANO	143,68	123,00	314,75	29,05	3,83	6,89	423,71
	INVIERNO	55,17	52,58	128,58	17,58	1,97	7,03	308,00
CANAL REACCIÓN EN PARALELO	VERANO	202,00	143,33	361,00	27,67	4,35	7,43	177,67
	INVIERNO	43,50	97,50	292,00	18,80	2,45	7,51	321,50
DISEÑO EDAR	-	360	250	-	50	13		

Se comprueba que las concentraciones contaminantes del agua bruta son menores en la época de invierno frente a la de verano, y en ambos casos inferiores a las de diseño. Esto verifica la existencia de infiltraciones en la red de saneamiento, así como de las aguas de escorrentía, y el efecto diluyente de las mismas en el agua residual que llega a la depuradora.

Exigencias de calidad en el vertido

Esta EDAR debe cumplir las exigencias de calidad del vertido establecidas en la Directiva 91/271/CEE. Dado que el vertido no se produce a una zona catalogada como sensible por requerimientos de Directiva no se le exigiría la eliminación de nutrientes, pero si para dar cumplimiento a la autorización de vertido de la instalación. Resumiendo los límites de vertido que se exigen a la planta son los siguientes:

Tabla 6 | Límites de vertido de la EDAR según el proyecto constructivo, según la Directiva 91/271/CEE y según la Autorización de vertido.

LÍMITES DE VERTIDO					
PARÁMETRO	UNIDADES	VALOR			% MÍNIMO REDUCCIÓN
		Diseño	Autorización de vertido	Directiva 91/271/CEE	Directiva 91/271/CEE
DBO ₅	mg/l	≤ 25	< 25	≤ 25	70 - 90
DQO	mg/l	-	< 125	≤ 125	75
Sólidos en suspensión totales (SST)	mg/l	≤ 35	< 35	≤ 35 ^(b)	90
Nitrógeno total (NT)	mg/l	≤ 15	< 15		-
Amoníaco	mg/l	≤ 2	-	-	-
Fósforo total (PT)	mg/l	≤ 2	< 2		-
pH	-	6 - 8	-	-	-

^(a) Este requisito es optativo.

Caudales y cargas efuentes

Las muestras de agua tratada se toman, igualmente empleando un tomamuestras automático durante 24 horas, en el canal de desinfección y se analizan los mismos parámetros que para el agua bruta, a excepción del nitrógeno total Kjeldahl (NTK). En su lugar se analiza el contenido de nitratos (NNO_3) y de nitrógeno total (NT). De nuevo a partir de los análisis mensuales se calculan los valores medios de cada parámetro. Se destacan en color rojo los valores que incumplen los límites de vertido.

Tabla 7 | Concentraciones medias de los parámetros en agua tratada.

	ÉPOCA	SST (mg/l)	DBO5 (mg/l)	DQO (mg/l)	NO3 (mg/l)	NT (mg/l)	PT (mg/l)	pH	CONDUCTIVIDAD ($\mu\text{S/cm}$)
CANAL REACCIÓN – DECANTACIÓN	VERANO	3,64	6,89	18,21	4,11	6,25	2,34	6,73	267,43
	INVIERNO	5,17	5,58	18,13	4,20	5,88	1,02	6,87	230,43
CANAL REACCIÓN EN PARALELO	VERANO	5,67	1,67	16,67	3,80	5,33	2,96	7,11	136,33
	INVIERNO	5,00	5,00	15,00	3,40	4,30	0,91	7,37	197,00

A tenor de los resultados, se observa que el problema principal de la planta radica en la eliminación del fósforo y en particular en la época de verano, cuando supera el límite de la Autorización de vertido de 2 mg/l.

Modelización de la EDAR objeto de estudio con el simulador bioWin 5.1

En el siguiente apartado se explican los pasos seguidos para la creación del modelo de la EDAR con el simulador BioWin versión 5.1, a partir del cual, una vez calibrado y validado, se analizan los distintos escenarios bajo los que optimizar su funcionamiento.

Para la simulación de la EDAR se ejecutan dos modelos base distintos correspondientes a las configuraciones bajo las que funcionó y funciona la planta actualmente: como doble canal de reacción – decantación entre julio de 2 014 y junio de 2 016, o como doble canal de reacción en paralelo desde agosto de 2 016.

Ambos modelos presentan en común las siguientes consideraciones:

En la línea de aguas, el influente se define empleando a DBO5 como parámetro representativo de la materia orgánica.

- En la etapa de pretratamiento sólo se representa la operación de desarenado, pues el programa no permite simular ninguna de las otras operaciones.
- Se obvia el bombeo de aguas de enjuague, por considerarlo un elemento innecesario en lo que al estudio de optimización del proceso depurativo se refiere.
- En la línea de fangos, no se contemplan los equipos de preparación y mezcla de polielectrolito.
- La representación de los tanques se efectúa a través de la combinación de varios elementos que representan las zonas con aireación y sin aireación en el mismo. Según la disposición de estos equipos en los tanques pueden diferenciarse en cada uno tres zonas estrictamente aerobias por ubicarse en ellas los equipos de aireación y otras zonas consideradas anóxicas por carecer de este equipo. La ubicación de los equipos y la distribución teórica de estas zonas se observa en las figuras 4 y 5:

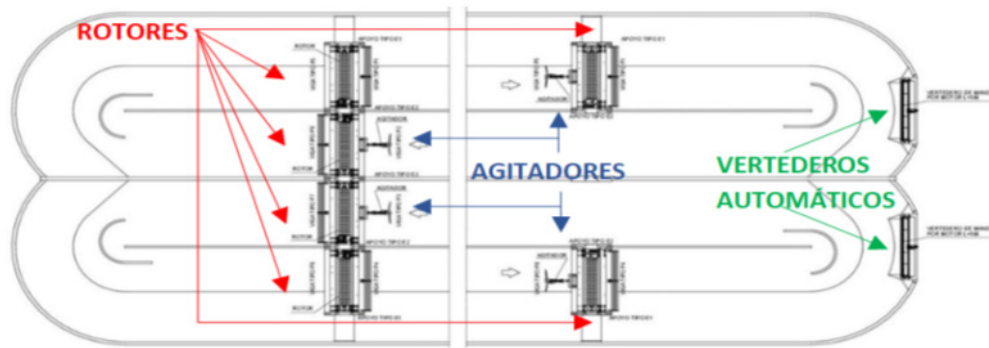


Figura 4 | Planta de los tanques de aireación con equipos instalados (Fuente: elaboración propia a partir de los planos del Proyecto constructivo de la EDAR)

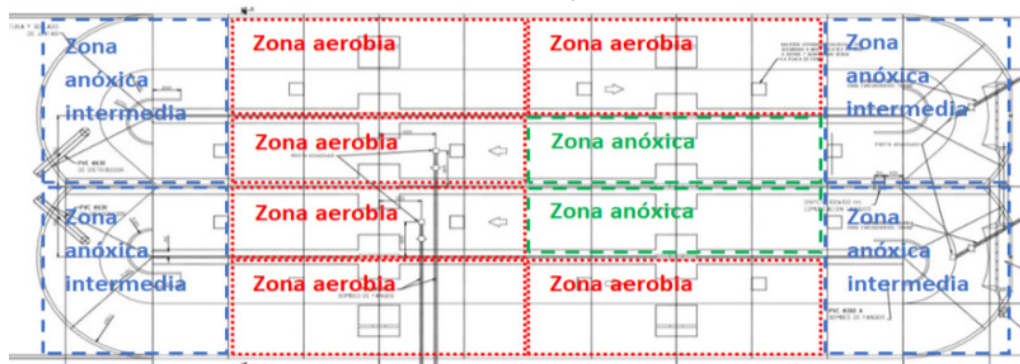


Figura 5 | Distribución teórica en planta de las zonas aerobias y anóxicas en función de los equipos instalados (Fuente: elaboración propia a partir de los planos del Proyecto constructivo de la EDAR).

En cuanto al proceso biológico, en cada modelo se reproduce su funcionamiento de forma distinta, acorde a la configuración de la EDAR, adoptando distintas simplificaciones:

- Modelo base de la EDAR con configuración de doble canal de reacción en paralelo (Modelo 1): se simplifica el esquema de funcionamiento de los tanques de aireación considerando que el caudal entrante en cada uno es del 50%, que funcionan acompasadamente en fase de nitrificación y desnitrificación, y que el caudal entrante y saliente del mismo es continuo. De esta forma no se produce el trasvase de agua de un tanque a otro y se simplifica el modelo. Por otra parte, cada tanque se simula mediante la combinación seis elementos tipo reactor que representan las zonas aireadas y las no aireadas por los rotadores.

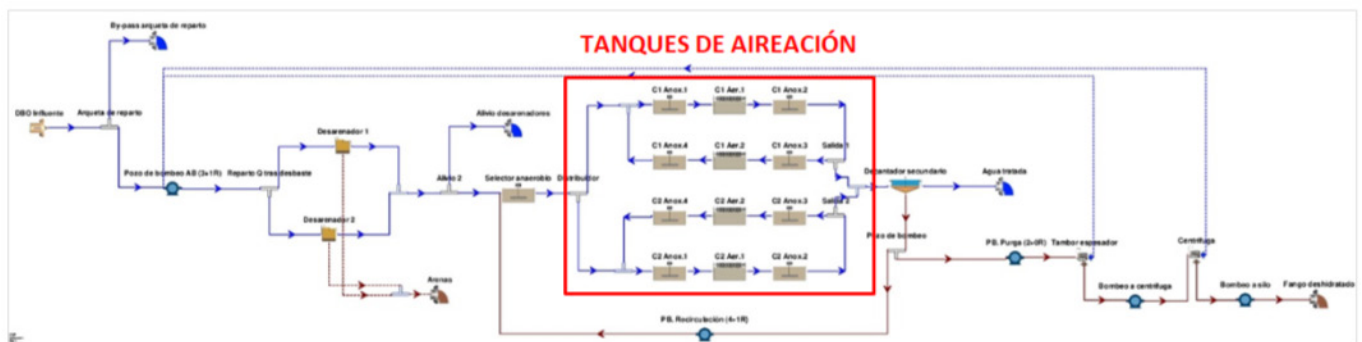


Figura 6 | Modelo base de la EDAR con configuración de doble canal de reacción en paralelo

- Modelo base de la EDAR con configuración de doble canal de reacción – decantación (Modelo 2): en este caso no se simula la alternancia de funciones de cada tanque como reactor y como decantador, si no que se opta por asignar a cada uno una única función durante el período de tiempo correspondiente. De esta forma la totalidad del caudal entra en el tanque en reacción y sale por el orificio de comunicación al tanque en decantación, siendo innecesario definir la apertura y cierre temporizados del distribuidor y de los vertederos. En este caso el tanque en reacción se simula mediante siete elementos tipo reactor que representan las zonas aireadas y las no aireadas por los rotores. Se representa también la salida de fangos desde el tanque en reacción hacia el pozo de bombeo.



Figura 7 | Modelo base de la EDAR con configuración de doble canal de reacción – decantación

Tal y como se comenta en el análisis de los influentes y los efluentes de la EDAR, debido a que se observa un problema grave de infiltraciones se hace una división de los datos en dos épocas del año: verano (meses de abril a septiembre) e invierno (meses restantes). Haciendo la misma diferenciación temporal en el análisis de la calidad de las aguas tratadas se observa un incumplimiento de la Autorización de vertido en fósforo sólo en la época de verano, cuando el problema de infiltraciones es poco acusado o inexistente, en ambas configuraciones. Por este motivo, y ya que el tratamiento conjunto de los datos en invierno y verano distorsiona el problema, se efectúa el ajuste de los modelos sólo para la época de verano y en estado estacionario.

Calibración del Modelo base de la EDAR con doble canal de reacción en paralelo (Modelo 1).

Los valores finalmente adoptados para determinados parámetros clave figuran tabla 8

Tabla 8 | Parámetros ajustados durante la calibración del modelo con doble canal de reacción en paralelo

ELEMENTO	PARÁMETRO A AJUSTAR	PARÁMETRO EN BIOWIN	VALOR DE PARTIDA	VALOR ADOPTADO
Arqueta de reparto	Q aliviado / Q agua bruta	$S/(S + M)$	0,1646 (a)	0,1640
	Q arenas	Underflow	6,00 m3/d (b)	7,00 m3/d
Desarenadores - desengrasadores	Rendimiento	% capture of inert suspended solids (ISS)	90,00 % (c)	92,50 %
Tanques de aireación: zonas aerobias	Consigna de oxígeno (mg/l)	OD (mg/l)	2,00 mg/l (d)	0,65 mg/l
Vertederos automáticos	(Q saliente del tanque de aireación) / (Q agua en recirculación en el tanque de aireación)	S/M	0,0099 (e)	0,01
Decantador	Rendimiento	% removal	95,00 % (c)	99,94%

secundario	Q fangos decantados (purgados + recirculados) / Q agua tratada	U/O	1,8218 (g)	1,8550
Estación de bombeo de fangos	Q fangos purgados / Q fangos recirculados	S/M	0,0058 (h)	0,0057

(a) Valor calculado en base a datos de caudales.

(b) Valor desconocido obtenido mediante el ajuste del modelo.

(c) Valor desconocido e impuesto a partir de recomendaciones bibliográficas (ITOHG - EDAR).

(d) Valor mínimo de 2 mg/l y máximo de 4 mg/l según datos operativos.

(e) Valor calculado a partir de las estimaciones de los caudales de circulación y recirculación.

(g) Valor calculado a partir de los valores promedio.

(h) Valor calculado a partir de los valores promedio.

Los valores obtenidos con el modelo calibrado tras la simulación en régimen estacionario se comparan con los valores medios de los registros históricos de la EDAR para evaluar su validez.

Tabla 9 | Resultados del efluente en el modelo calibrado de la EDAR con doble canal de reacción en paralelo

	CAUDAL TRATADO (m3/d)	SST (mg/l)	DBO5 (mg/l)	DQO (mg/l)	NO3 (mg/l)	NT (mg/l)	PT (mg/l)	pH
Valores promedio (verano)	2.613	5,67	1,67	16,67	3,80	5,33	2,96	7,11
Resultado modelo calibrado	2.598	5,72	1,30	23,39	3,56	5,55	3,24	7,53
Diferencia (% del valor promedio)	0,57 %	0,88 %	22,15%	40,31%	6,31%	4,12%	9,46%	5,90%

La diferencia entre los valores promedio y los obtenidos con el modelo calibrado difieren en menos de un 10% del valor real a excepción de la DBO5 y de la DQO, cuya diferencia es más acusada. Sin embargo estos valores se encuentran próximos al límite de detección del laboratorio, lo que puede explicar estas diferencias.

Algunos parámetros de funcionamiento de la planta en la línea de aguas y en la línea de fangos se recogen a continuación.

Tabla 10 | Parámetros de funcionamiento de la línea de aguas y de fangos en el modelo calibrado de la EDAR con doble canal de reacción en paralelo

	SSLM (mg/l) tanque	SSVLM (mg/l) tanque	Fango deshidratado (kg MS/d)	MS del fango deshidratado (%)	SSTLM (mg/l) fangos recirculados	SSVLM (mg/l) fangos recirculados
Valores de referencia (verano)	3 740(a)	2 440(a)	120,80 – 177,50(b)	22(c)	3 850(d)	2 740(d)
Resultado modelo calibrado	3 339	2 844	136,17	21,9	5 136	4 374
Diferencia (% del valor de referencia)	10,72 %	16,55 %		0,45 %	33,37 %	59,63 %

(a) Se dispone de un único dato en época de verano

(b) Valor estimado.

(c) Se dispone de una analítica en época de verano durante el periodo de funcionamiento de la EDAR bajo la configuración canal de reacción – decantación.

(d) Se dispone de una analítica en época de invierno durante el periodo de funcionamiento de la EDAR bajo la configuración doble canal de reacción en paralelo.

El programa indica que para este modelo la edad del fango es de 55,60 días, muy superior a la habitual en un proceso de aireación prolongada que se encontraría entre 20 - 30 días según la bibliografía consultada ("*Manual de diseño de Estaciones depuradoras de aguas residuales*" de Aurelio Hernández Lehmann y "Tratamientos biológicos de aguas residuales" de José Ferrer Polo). En cuanto a los niveles de oxígeno disuelto en el reactor, según los controles realizados en la planta en la época de verano, el valor medio de la concentración de oxígeno disuelto en la zona aireada es de 2,93 mg/l, valor que dista mucho de los 0,65 mg/l obtenidos en la simulación.

En base a estas consideraciones se estima suficientemente aproximado el modelo y se prosigue en el análisis de optimización del mismo.

Calibración del Modelo base de la EDAR con doble canal de reacción – decantación (Modelo 2)

En la Tabla 11 aparecen los valores finalmente adoptados para los parámetros clave del modelo.

Tabla 11 | Parámetros ajustados durante la calibración del modelo de doble canal de reacción – decantación.

Elemento	Parámetro a ajustar	Parámetro en BioWin	Valor de partida	Valor adoptado
Arqueta de reparto	Q aliviado / Q agua bruta	$S/(S + M)$	0,1274 (a)	0,1270
Desarenadores - desengrasadores	Q arenas	Underflow	7,00 m ³ /d (b)	7,00 m ³ /d
	Rendimiento	% capture of ISS	92,50 % (b)	92,50 %
Tanques de aireación en reacción: zonas aerobias	Consigna de oxígeno (mg/l)	OD (mg/l)	0,70 mg/l (c)	0,875 mg/l
Salida de fangos del tanque en reacción	(Q fangos saliente del tanque en reacción) / (Q de circulación en el tanque tras el trasvase de agua al tanque en decantación)	$S/(S + M)$	0,0010 (d)	0,0005
Comunicación entre tanques	(Q agua saliente del tanque en reacción al tanque en decantación) / (Q de circulación en el tanque en reacción)	$S/(S + M)$	0,0223 (e)	0,0223
Tanque de aireación en decantación	Rendimiento	% removal	99,90 % (c)	99,94%
	(Q fangos generados en el tanque en decantación) / (Q agua saliente del tanque en reacción)	$U/(U + O)$	0,5284 (f)	0,5500
Estación de bombeo de fangos	Q fangos purgados / Q fangos recirculados	S/M	0,0087 (g)	0,00845

(a) Valor calculado en base a datos de caudales

(b) Valor desconocido. Se adopta como valor de partida el valor finalmente adoptado del modelo anterior.

(c) Valor desconocido. Se adopta como valor de partida uno similar al adoptado en el modelo anterior.

(d) Valor desconocido. Se obtiene el valor definitivo tras el ajuste de los demás elementos que simulan el doble canal de reacción – decantación.

(e) Valor calculado a partir de las estimaciones de los caudales de circulación en el tanque en reacción y de recirculación de fangos.

(f) Valor calculado a partir de los valores promedio de: (Q fangos recirculados + Q fangos purgados) / (Q fangos recirculados + Q fangos purgados + Q agua tratada).

(g) Valor calculado a partir de los valores promedio.

En la Tabla 12 se comparan los resultados obtenidos tras la simulación en régimen estacionario del modelo calibrado con los valores medios de los registros históricos de la EDAR para evaluar su validez.

Tabla 12 | Resultados del efluente en el modelo calibrado de la EDAR con doble canal de reacción - decantación (Modelo 2)

	Caudal agua tratada (m ³ /d)	SST (mg/l)	DBO5 (mg/l)	DQO (mg/l)	NO3 (mg/l)	NT (mg/l)	PT (mg/l)	pH
Valores promedio (verano)	3 954,89	3,64	6,06	18,21	4,11	6,25	2,34	6,73
Resultado modelo calibrado	3 883,80	3,85	1,67	19,69	3,86	6,20	2,31	7,40
Diferencia entre datos (% del valor real)	1,80 %	5,77 %	72,44%	8,13 %	6,08 %	0,80 %	1,28 %	9,96 %

La diferencia entre los valores promedio y los obtenidos con el modelo difieren en menos de un 10% del valor real a excepción de la DBO₅. Al igual que en el ajuste del modelo anterior, este hecho puede justificarse ya que al tratarse de valores muy bajos se encuentran muy próximos al límite de detección del laboratorio.

En la tabla 13 se muestran algunos parámetros de funcionamiento de la planta en las líneas de agua y fangos.

Tabla 13 | Parámetros de funcionamiento de la línea de aguas y de fangos en el modelo calibrado de la EDAR con doble canal de reacción – decantación (Modelo 2).

	SSLM (mg/l)	SSVLM (mg/l)	Fango deshidratado (kg MS/d)	MS del fango deshidratado (%)	SSTLM (mg/l) recirculación	SSVLM (mg/l) recirculación
Valores de referencia (verano)	2 778(a)	2 009(a)	125,64 – 392,64(b)	22(c)	3 850(d)	2 740(d)
Resultado modelo calibrado	2 884	2 537	206,6	22	5 153	4 532
Diferencia (% del valor de referencia)	3,81 %	26,28 %		0 %	33,84 %	65,40 %

^(a) Valores promedio en época de verano.

^(b) Valor estimado.

^(c) Se dispone de una analítica en época de verano durante el periodo de referencia

^(d) Se dispone de una analítica en época de invierno durante el periodo de referencia

La edad del fango bajo esta configuración de la planta es de 31,66 días, acorde a un proceso de aireación prolongada según la bibliografía consultada. Según los controles realizados en la planta en la época de verano, el valor medio de la concentración de oxígeno disuelto es de 2,33 mg/l, que dista mucho de los 0,875 mg/l de la simulación.

RESULTADOS

Optimización de la eliminación biológica de fósforo en el Modelo 1: modificación de la aireación y de la edad del fango (SRT)

En primer lugar, se simulaban varios casos en los que la consigna de oxígeno va reduciéndose progresivamente hasta conseguir que el nivel de fósforo en el efluente sea el adecuado. En la Tabla 14 se ve claramente cómo a pesar de reducir el nivel de oxígeno hasta niveles casi nulos, la concentración de fósforo en el efluente sigue siendo superior a 2 mg/l.

Tabla 14 | Resultados del efluente en el modelo de la EDAR con doble canal de reacción en paralelo variando la consigna de oxígeno

	NH3 (mg/l)	NO3 (mg/l)	NO2 (mg/l)	NTK (mg/l)	NT (mg/l)	PT (mg/l)	SST (mg/l)	DQO (mg/l)	DBO5 (mg/l)	pH
Punto de partida	0,37	3,56	0,16	1,44	5,55	3,24	5,72	23,39	1,30	7,53
OD = 0,50 mg/l	0,47	1,87	0,29	1,54	4,09	3,05	5,84	24,45	1,33	7,55
OD = 0,40 mg/l	0,59	0,23	0,69	1,67	2,98	2,83	5,97	25,72	1,39	7,56
OD = 0,30 mg/l	0,89	0,00	1,13	1,96	3,50	2,75	6,09	26,31	1,55	7,56
OD = 0,20 mg/l	2,03	0,00	0,19	3,17	3,77	2,15	6,36	29,81	1,60	7,58

Al disminuir las consignas de oxígeno empeora el proceso de biodegradación de la materia orgánica, así como la nitrificación, disminuyendo la concentración de amonio que no se convierte en nitrito y la del nitrito en nitrato. Para una consigna de 0,2 mg/l se anula prácticamente la nitrificación, con un nivel de amonio en el efluente de 2,03 mg/l, superior a la concentración límite de diseño del proyecto constructivo.

En segundo lugar, se simulan distintos casos en los que la edad del fango (SRT) se reduce, con objeto de analizar las variaciones que implica en el efluente (Tabla 15).

Tabla 15 | Resultados del efluente en el modelo de la EDAR con doble canal de reacción en paralelo variando la edad del fango

	NH3 (mg/l)	NO3 (mg/l)	NO2 (mg/l)	NTK (mg/l)	NT (mg/l)	PT (mg/l)	SST (mg/l)	DQO (mg/l)	DBO5 (mg/l)	pH
Punto de partida	0,37	3,56	0,16	1,44	5,55	3,24	5,72	23,39	1,30	7,53
SRT = 50 días	0,39	3,56	0,16	1,45	5,52	3,22	5,23	22,76	1,31	7,53
SRT = 40 días	0,39	3,55	0,17	1,46	5,48	3,17	4,33	21,61	1,31	7,53
SRT = 30 días	0,40	3,54	0,19	1,48	5,44	3,11	3,40	20,42	1,31	7,54

En base a los resultados observados bajo estas dos experiencias, se concluye que es necesario combinarlas para conseguir reducir la concentración de fósforo en el efluente. Tras varias pruebas se adopta como solución final la combinación de una reducción de la consigna de oxígeno hasta 0,22 mg/l y una reducción de la edad del fango a 35 días

Tabla 16 | Resultados del efluente en el modelo 1 de la EDAR variando la consigna de oxígeno y la edad del fango

	NH3 (mg/l)	NO3 (mg/l)	NO2 (mg/l)	NTK (mg/l)	NT (mg/l)	PT (mg/l)	SST (mg/l)	DQO (mg/l)	DBO5 (mg/l)	pH
Punto de partida	0,37	3,56	0,16	1,44	5,55	3,24	5,72	23,39	1,30	7,53
SRT = 40 días OD = 0,40 mg/l	0,62	0,17	0,85	1,70	3,01	2,65	4,50	23,80	1,40	7,56
SRT = 40 días OD = 0,30 mg/l	0,95	0,00	1,18	2,01	3,50	2,54	4,65	24,35	1,55	7,56
SRT = 40 días OD = 0,22 mg/l	1,75	0,00	0,29	2,86	3,46	2,03	4,81	26,68	1,60	7,58
SRT = 35 días OD = 0,22 mg/l	1,84	0,00	0,29	2,94	3,51	1,89	4,32	25,98	1,60	7,58

Optimización de la eliminación biológica del fósforo en la EDAR en el Modelo 2: reducción de la aireación

En la Tabla 17 se observa la reducción de la concentración de fósforo en el efluente al reducir la consigna de oxígeno en los tanques de aireación y en la Tabla 18 figuran los principales datos relativos a la producción de fangos, al variar los niveles de oxígeno.

Tabla 17 | Resultados del efluente en el modelo de la EDAR con doble canal de reacción – decantación variando la consigna de oxígeno.

	NH3 (mg/l)	NO3 (mg/l)	NO2 (mg/l)	NTK (mg/l)	NT (mg/l)	PT (mg/l)	SST (mg/l)	DQO (mg/l)	DBO5 (mg/l)	pH
Punto de partida	0,57	3,86	0,38	1,68	6,20	2,31	3,85	19,69	1,67	7,40
OD = 0,70 mg/l	0,74	0,74	1,15	1,84	4,57	1,95	3,98	20,61	1,74	7,40
OD = 0,675 mg/l	0,78	0,38	1,81	1,88	4,35	1,85	4,02	20,86	1,78	7,40
OD = 0,65 mg/l	0,83	0,07	2,61	1,93	4,90	1,82	4,06	20,94	1,84	7,40

Tabla 18 | Resultados de la producción de fangos en el modelo 2 de la EDAR (doble canal de reacción – decantación)

	Fango deshidratado (m3/d)	Fango deshidratado (kg MS/d)	Porcentaje de MS fango deshidratado (%)
Punto de partida	0,94	206,60	22,00
OD = 0,70 mg/l	0,94	213,85	22,80
OD = 0,675 mg/l	0,94	216,05	23,00
OD = 0,65 mg/l	0,94	217,89	23,20

Se adopta como solución final la reducción de la consigna de oxígeno del modelo calibrado en un 22,85% (hasta 0,675 mg/l de oxígeno disuelto), con la que la concentración de fósforo en el efluente se reduce a 1,85 mg/l. Se adopta esta solución más conservadora y no la de una reducción del 20% (consigna de 0,70 mg/l de oxígeno disuelto) por considerar que una concentración de fósforo de 1,95 mg/l en efluente está demasiado próxima al límite de 2 mg/l.

DISCUSIÓN

Del análisis de la modelización realizada a esta EDAR se llega a las siguientes conclusiones:

Es importante analizar la existencia o no de un problema de infiltraciones en la red de saneamiento a la que se conecta la planta objeto de estudio que se pretende modelizar.

Ya que esta EDAR concreta presenta un problema de infiltraciones, los valores medios de caudales y concentraciones del influente y el efluente que han de tomarse de referencia son los de la época de verano, cuando el problema de infiltraciones se reduce o anula. De este modo se identifican los problemas depurativos reales de la planta, que en este caso se focalizan en la eliminación del fósforo.

Es necesario crear dos modelos distintos de la planta en BioWin para simular el funcionamiento de la misma según las configuraciones bajo las que funciona: el modelo de la EDAR con doble canal de reacción en paralelo (Modelo 1) y el modelo con doble canal de reacción – decantación (Modelo 2).

El modelo de la EDAR con doble canal de reacción – decantación (Modelo 2) es más representativo del funcionamiento real de la planta al tomar como referencia valores promedios de caudales y concentraciones en el influente y el efluente en un período de tiempo relativamente extenso.

El modelo de la EDAR con doble canal de reacción en paralelo (Modelo 1) presenta una representatividad más limitada al tomar como referencia valores promedios de caudales y concentraciones en el influente y el efluente de 5 meses.

El ajuste de ambos modelos podría mejorarse si se contara con más datos que evitaran la realización de estimaciones, como en el caso de la producción de fangos.

Se verifica que, mediante una reducción de la aireación en el modelo de la EDAR con doble canal de reacción – decantación y una reducción combinada de la aireación y de la edad del fango en el modelo con doble canal de reacción en paralelo; se potencia el desarrollo de las bacterias PAO y se mejora el proceso biológico de eliminación de fósforo cumpliendo teóricamente el límite impuesto en la Autorización de vertido.

Se ratifica que la reducción de la aireación supone un empeoramiento del proceso de nitrificación – desnitrificación de la planta respecto a la situación actual de partida, sin llegar a incumplir los límites de vertido en nitrógeno total.

La reducción de la aireación es más acusada en el modelo de la EDAR con doble canal de reacción en paralelo (un 66,35%) que en el modelo con doble canal de reacción – decantación (22,85%), lo cual tiene sentido teniendo en cuenta que los rendimientos de eliminación de fósforo total para la situación actual son mayores en este último modelo (comparando las concentraciones en el efluente y el influente).

CONCLUSIONES

Más allá del caso concreto de la EDAR modelizada en este trabajo, los distintos software de modelización de los procesos biológicos y físico - químicos existentes en las plantas de tratamiento de aguas residuales constituyen una herramienta muy útil como apoyo a la toma de decisiones en las labores de explotación.

AGRADECIMIENTOS

Este estudio se realiza en el marco del contrato de “Asistencia Técnica al Control y Asesoramiento a la Explotación de las instalaciones de Depuración de Aguas Residuales de Galicia (OH.388.346.SV)

Los autores agradecen la colaboración de la empresa explotadora de la EDAR objeto de estudio, en este caso Espina y Delfin S.L. por la información aportada sobre las condiciones de funcionamiento de la planta.

REFERENCIAS

Aurelio Hernández Lehman. *Manual de diseño de Estaciones Depuradoras de Aguas Residuales* Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos.

Ferrer Polo, J, Seco Torrecilla, A *Tratamientos biológicos de aguas residuales*” Universidad Politécnica de Valencia

EnviroSIM Associates Ltd. (2016) *User Manual for Biowin 5.1*
