



Estudio hidrodinámico de un tanque de abastecimiento de agua potable mediante herramientas de simulación computacional (CFD)

En el presente estudio se ha elaborado un modelo de simulación aplicado a un tanque de agua potable utilizando herramientas de cálculo basadas en la mecánica de fluidos computacional (*computational fluid dynamics*, CFD). El modelo elaborado ha permitido estudiar en detalle el comportamiento hidrodinámico en el interior del tanque de abastecimiento de agua potable a escala real y en 3D, considerando los diferentes aportes de agua en régimen dinámico y utilizando aproximaciones novedosas para reproducir su influencia. El modelo CFD ha permitido realizar un estudio comparativo entre el diseño actual y una nueva configuración propuesta. La optimización consiste en una serie de cambios en la configuración de las tuberías de aporte, que permiten maximizar el grado de dilución de nitratos y minimizar los costes de operación en régimen dinámico.

Palabras clave

CFD, depósito de agua potable, análisis hidrodinámico, simulación computacional, optimización.

HYDRODYNAMIC ANALYSIS OF A DRINKING WATER SUPPLY TANK USING COMPUTATIONAL SIMULATION TOOLS (CFD)

In this study, a simulation model of a drinking water tank has been developed using computational fluid dynamics (CFD). The 3D full-scale model allows the hydrodynamics inside tank to be analysed in detail, considering the different inlets of water in dynamic regime, and using novel approaches to reproduce their influence. A comparative study between the current design and the new retrofitted configuration has been developed using different mathematical approaches. The retrofitting consisted of changes in the configuration of the supply pipes, which optimized the mixing of nitrates in dynamic regime, obtaining lower concentration values exiting the tank, and minimizing operating costs.

Keywords

CFD, drinking water tank, hydrodynamics, modelling, retrofitting.

Miguel Ortiz Gómez
subdirector técnico
de Abastecimientos
de Sociedad de Fomento Agrícola
Castellonense, S.A. (Facsca)

José Vilarroig
CTO de Hydrodynamic and
Environmental Services (Hydrens)

Javier García Castillo
jefe del Departamento
de Potabilización
de Sociedad de Fomento Agrícola
Castellonense, S.A. (Facsca)

Manuel Ortiz
técnico de Potabilización
de Sociedad de Fomento Agrícola
Castellonense, S.A. (Facsca)

Raúl Matéiz Cuenca
profesor ayudante doctor
en la Universitat Jaume I (UJI)

Javier Climent
CEO de Hydrodynamic and
Environmental Services (Hydrens)

Sergio Chiva
profesor titular en la Universitat
Jaume I (UJI)



1. INTRODUCCIÓN

La simulación CFD es una herramienta ampliamente utilizada en diferentes campos de la ingeniería que permite prever el comportamiento y la interacción de los líquidos y gases en determinadas instalaciones industriales y en un amplio abanico de condiciones de contorno. Los resultados de los análisis CFD se utilizan de forma general para el estudio de nuevos diseños, el desarrollo de nuevos productos, reparaciones, rediseños y optimización. Estas herramientas son capaces de reproducir la fluidodinámica en detalle, para poder determinar y analizar problemas específicos, alcanzando un grado de precisión al que los otros simuladores y aproximaciones matemáticas no llegan. La aplicación de estas técnicas de simulación reporta mejoras de la eficiencia de los procesos, que conlleven beneficios inmediatos al reducir costes y mejorar la calidad del agua. La aplicación de estas técnicas resulta de gran utilidad en el sector del agua.

Las herramientas CFD se han aplicado en el sector del agua desde hace aproximadamente dos décadas (Brouckaert y Buckley, 1999). El nuevo contexto de creciente demanda hídrica y búsqueda de una gestión eficiente del agua ha extendido este tipo de técnicas de simulación al abastecimiento de agua potable. Su uso se ha generalizado debido a que, además del conocimiento que aportan al reproducir en detalle el comportamiento hidrodinámico, transporte y mezclado del flujo (Templeton *et al.*, 2006), también se pueden considerar reacciones químicas de desinfección que tienen lugar en el proceso (Wols, 2011). Ello hace posible el estudio de las problemáticas asociadas a la hidrodinámica, especialmente en tanques a escala real como las que se han estudiado en

este trabajo: cortocircuitos hidráulicos, volúmenes muertos o falta de renovación, grado de mezcla o dilución insuficiente, arrastre de sólidos, gradientes de concentración de contaminantes, zonas estancas de baja velocidad, fenómenos de estratificación del flujo, efecto fluidodinámico de elementos internos (deflectores, tuberías, agitadores, etc.), reparto del flujo de entrada, salida y cálculo del tiempo de residencia.

El control y simulación de todas estas variables permite realizar simulaciones con geometrías parametrizadas para ver el efecto de diferentes elementos y realizar un diseño final que proporcione un funcionamiento óptimo en el sistema (Haiwen y Strenstrom, 2019). Finalmente, cabe mencionar que resulta recomendable apoyarse en datos y medidas experimentales directas en el sistema para garantizar la fiabilidad de las predicciones de las simulaciones (Climent *et al.*, 2018).

El principal objetivo del estudio consiste en elaborar un modelo de simulación capaz de reproducir con detalle el comportamiento hidrodinámico en el interior de un depósito de abastecimiento al cual le llegan diferentes aportes con diferente caudal y composición, lo que produce que los valores de nitratos a la salida no sean constantes a lo largo del tiempo. La finalidad del estudio es la de minimizar la concentración de

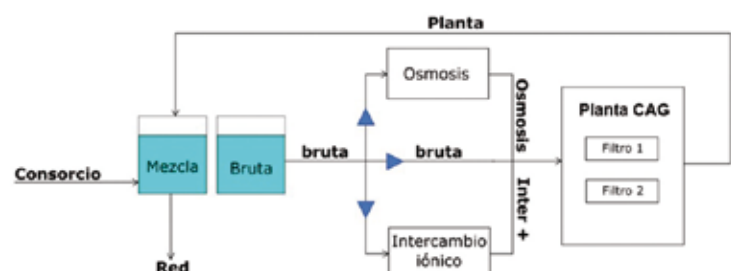
nitrato de la corriente resultante suministrada a la red.

2. MATERIAL Y MÉTODOS

La metodología y estrategia seguidas han consistido en dividir el estudio en dos fases: análisis de un modelo estacionario; y uno dinámico. La principal ventaja que presenta el primero es el ahorro en el tiempo de computación. Este tipo de modelos permiten elaborar y calcular de forma ágil diferentes diseños del depósito para elegir el que presenta, de forma preliminar, un mejor comportamiento respecto al actual. Además, la elaboración de este tipo de modelos puede servir como una primera aproximación, que reduzca sustancialmente la cantidad de modelos dinámicos a simular en la segunda fase del estudio.

Con el fin de obtener con rapidez una primera aproximación del depósito de agua, se ha considerado su modelado a escala real en una única fase (la líquida), conservando la geometría, posición de las entradas y salidas y una altura de lámina de agua de 2,5 m. De las dos entradas al depósito, una proviene de un consorcio y otra de sendas plantas de tratamiento por intercambio iónico y por ósmosis inversa, cuyos caudales se mezclan con el aporte de un pozo (agua bruta). En la **Figura 1** se presenta un esquema hidráulico de la instalación.

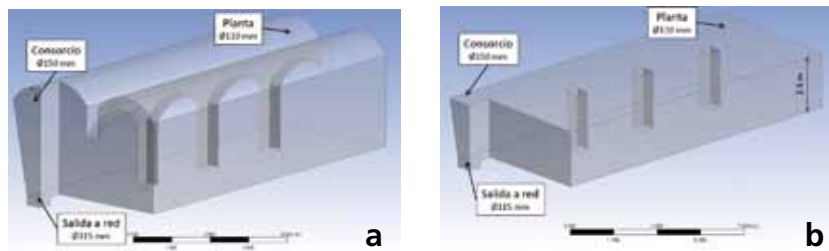
FIGURA 1. Esquema hidráulico de la estación. Entradas y salidas al depósito de estudio (mezcla).



La salida es única y se dirige directamente a la red de distribución de la población. Para el caso en estado estacionario, tanto a las entradas (de planta y de consorcio) como a la salida a red, se les ha asignado un valor constante. Se ha analizado la distribución de velocidades, y de concentraciones que presentaría un pulso de la especie nitratos introducido por planta y por consorcio para diferentes diseños planteados. Estas simulaciones estacionarias permiten determinar de forma rápida cuál de todos los modelos propuestos presenta mejores comportamientos y es susceptible de ser analizado más en detalle utilizando simulaciones dinámicas.

Tras determinar el diseño que proporciona los mejores resultados en las simulaciones estacionarias, se han realizado las simulaciones dinámicas de dicho modelo. En los modelos dinámicos, se pueden representar entradas y salidas que presentan una variación con el tiempo. Así pues, se pueden introducir como valores de entrada y salida la evolución de los diferentes caudales y concentraciones de sustancias de

FIGURA 2. Modelo CAD del depósito real (a) y del depósito simplificado para realizar las simulaciones estacionarias y dinámicas (b).



estudio (en este caso nitratos) para determinar cuál será su distribución y comportamiento en el interior del tanque en función del tiempo. En general, la principal desventaja de los modelos dinámicos con lámina libre es la cantidad de tiempo computacional que requieren. En este caso, se ha definido una aproximación matemática para determinar la variación de la altura de la lámina de agua, con lo que se consigue un modelo dinámico estable, liviano y con una representación muy cercana a lo que ocurre en la situación real.

2.1. SIMULACIONES EN RÉGIMEN ESTACIONARIO

Se ha realizado el modelo con todas las entradas y salidas que se tiene

actualmente, tal y como puede verse en la **Figura 2**. Cabe comentar que en la instalación real existen dos depósitos simétricos separados por un muro intermedio. La salida de cada depósito se encuentra conectada a la tubería de red mediante una intersección en forma de T. Las simulaciones se han realizado para un único depósito, realizando las simplificaciones de la **Figura 2b**, donde se ha realizado un corte a una altura de 2,5 m (que representa la altura de la lámina de agua). Las diferentes entradas que se realizan por la parte superior del depósito se han reubicado en consecuencia.

Para las simulaciones en régimen estacionario se han propuesto 4 diseños diferentes, que pueden verse en la **Figura 3**. Las geometrías han sido generadas mediante herramientas de CAD y puede apreciarse cómo las modificaciones realizadas en cada propuesta se centran en la ubicación de la entrada de consorcio con el objetivo de mejorar la dispersión y conseguir un mezclado lo más homogéneo posible en la salida a red. De las 4 propuestas de mejora simuladas, la propuesta 1 es la única que plantea la entrada a través de una única tubería. La propuesta 2 exige la realización de las entradas a través del muro y, para las propuestas 3 y 4, es necesario introducir un sistema de tuberías que permitan la entrada de planta y consorcio por varios orificios.

FIGURA 3. Propuestas de mejora simuladas para el depósito.

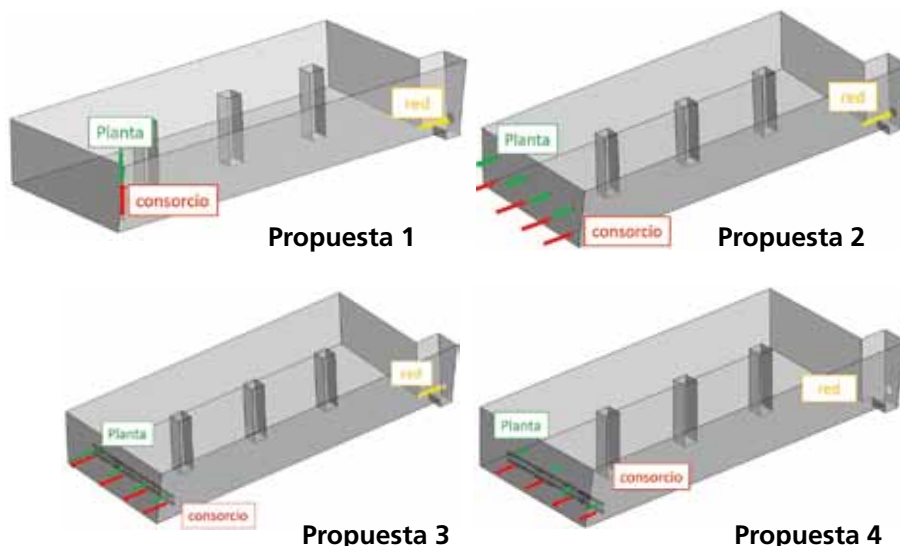
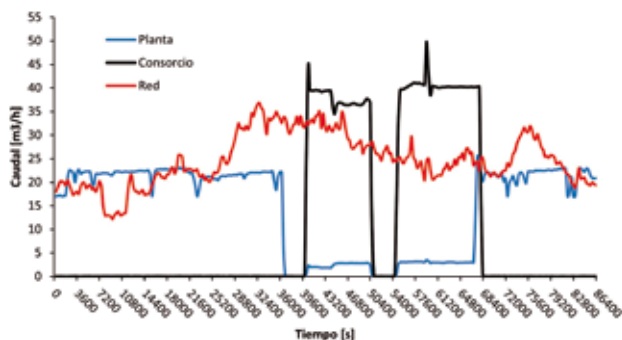




FIGURA 4. Curvas de caudal de las entradas y de la salida.



Para mallar las geometrías CAD, se ha hecho hincapié en el refinado de las entradas tanto de consorcio como de planta y también de la salida a red. Dada la naturaleza de la geometría, se han utilizado nodos hexaédricos para acelerar el cálculo de las simulaciones. Los modelos finales presentan una cantidad total de nodos que varía entre los 250.000 y los 260.000 nodos con refinamientos de hasta 0,06 m en las entradas y salidas y 0,1 m de tamaño de nodo en el dominio principal. El modelo de turbulencia utilizado ha sido el K- ϵ (Menter, 1994) dado que presenta un cálculo óptimo teniendo en cuenta la interacción del flujo con las paredes.

Las condiciones de caudal en las entradas y salidas han seguido una curva temporal que se muestra en la **Figura 4**. Estas curvas generan una variación en la altura de la lámina de agua tal y como se analizará en el modelo dinámico. Para realizar la simulación en régimen estacionario, las curvas dinámicas se han sustituido por situaciones concretas de funcionamiento donde el caudal de entrada se considera constante en todo el intervalo. Para poder cuantificar y comparar los efectos de los caminos preferenciales y de los cortocircuitos detectados, tanto en las distribuciones de velocidad como en las distribuciones del tiempo de re-

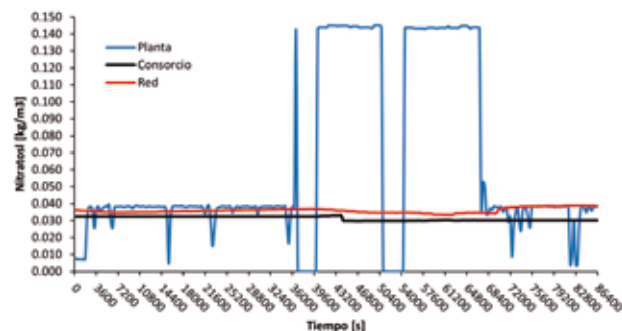
sidencia hidráulico, se ha calculado la evolución en la salida de un pulso de nitratos realizado por la entrada de planta y por la entrada de consorcio. El objetivo es determinar el tiempo que tarda dicho pulso de nitratos en detectarse a la salida a red y qué concentración presenta en ese punto. El pulso inyectado tiene una concentración de 250 mg/L y se produce durante un intervalo de tiempo de 5 segundos.

2.2. SIMULACIONES EN RÉGIMEN DINÁMICO

Para la realización de las simulaciones en régimen dinámico, se han simulado los modelos del caso actual y de la propuesta que mejor resultado ha proporcionado en las simulaciones en régimen estacionario, modificando las condiciones de contorno utilizadas en los caudales de las entradas en régimen dinámico. Para ello se utilizan las curvas de caudal de proceso (**Figura 4**), la variación en la concentración de nitratos para cada entrada (**Figura 5**) y la variación de altura de la lámina libre.

En cuanto a las concentraciones de nitratos en red, estas son las proporcionadas por un sensor situado a la salida del depósito. En las simulaciones, estas concentraciones de salida son calculadas por el código. Los periodos en los que las concentraciones por planta

FIGURA 5. Evolución de las concentraciones de nitratos en las entradas de consorcio y planta y en la salida a red.



son muy elevadas (desde 39.600 a 68.400 segundos aproximadamente) se corresponden con los periodos en los que únicamente está entrando caudal procedente del pozo (bruta) tal y como puede verse en la **Figura 4**. El resto del tiempo, el caudal por planta es una combinación entre el agua procedente de bruta y de intercambio iónico y, por tanto, las concentraciones son más estables.

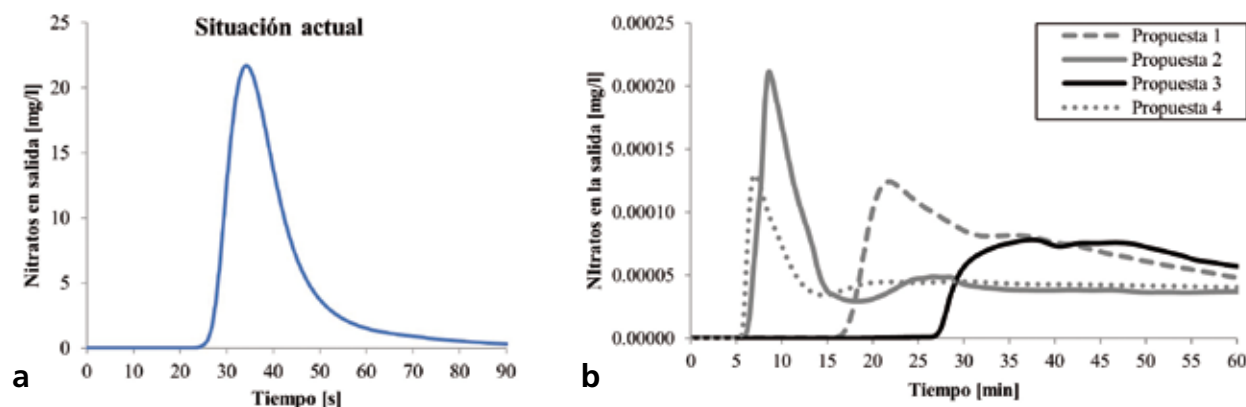
3. DISCUSIÓN

3.1. RESULTADOS DE LAS SIMULACIONES EN RÉGIMEN ESTACIONARIO

Para realizar la comparativa entre los diferentes modelos propuestos, se ha realizado el análisis del comportamiento del pulso de nitratos de manera que se muestre la evolución de su concentración en la salida de red. Esta evolución se ha representado para las 4 propuestas de mejora y para la simulación de la situación que se tiene actualmente, dando como resultado las gráficas que pueden verse en la **Figura 6**.

Este análisis confirma el cortocircuito que se produce entre la entrada de consorcio y la salida a red en la situación que se tiene actualmente, ya que el pulso de nitratos se detecta a la salida en tan solo 35 segundos y con una concentración

FIGURA 6. Evolución del pulso de nitratos por la salida de red para (a) la situación actual sin mejora y (b) las propuestas de mejora.



elevada de 22 mg/L. Por tanto, en los momentos en los que la entrada al depósito se realice por la entrada de consorcio, se tiene una mezcla deficiente con el resto del volumen del tanque. Así, las concentraciones que existan en consorcio se transmitirán casi de forma directa a la salida de red sin que exista prácticamente ninguna dilución previa.

Así mismo, cuando se analizan las curvas de concentración de nitratos obtenidas para las propuestas de mejora, se puede ver que todas las propuestas mejoran drásticamente la configuración actual. Al analizar con detenimiento los resultados obtenidos, se puede observar que los mejores resultados se obtienen para las propuestas 1 y 3. La característi-

ca común de estas dos propuestas es que no tienen ninguna de las entradas enfocadas hacia la salida a red. Sin embargo, tanto en la propuesta 2 como en la propuesta 4 algunas de las entradas (en el caso de la propuesta 2, todas ellas) se encuentran enfocadas hacia la salida. Esto provoca que el fluido entrante alcance de forma más rápida

FIGURA 7. Distribución de velocidades en planos a 0,3 m de la solera, para las diferentes propuestas.

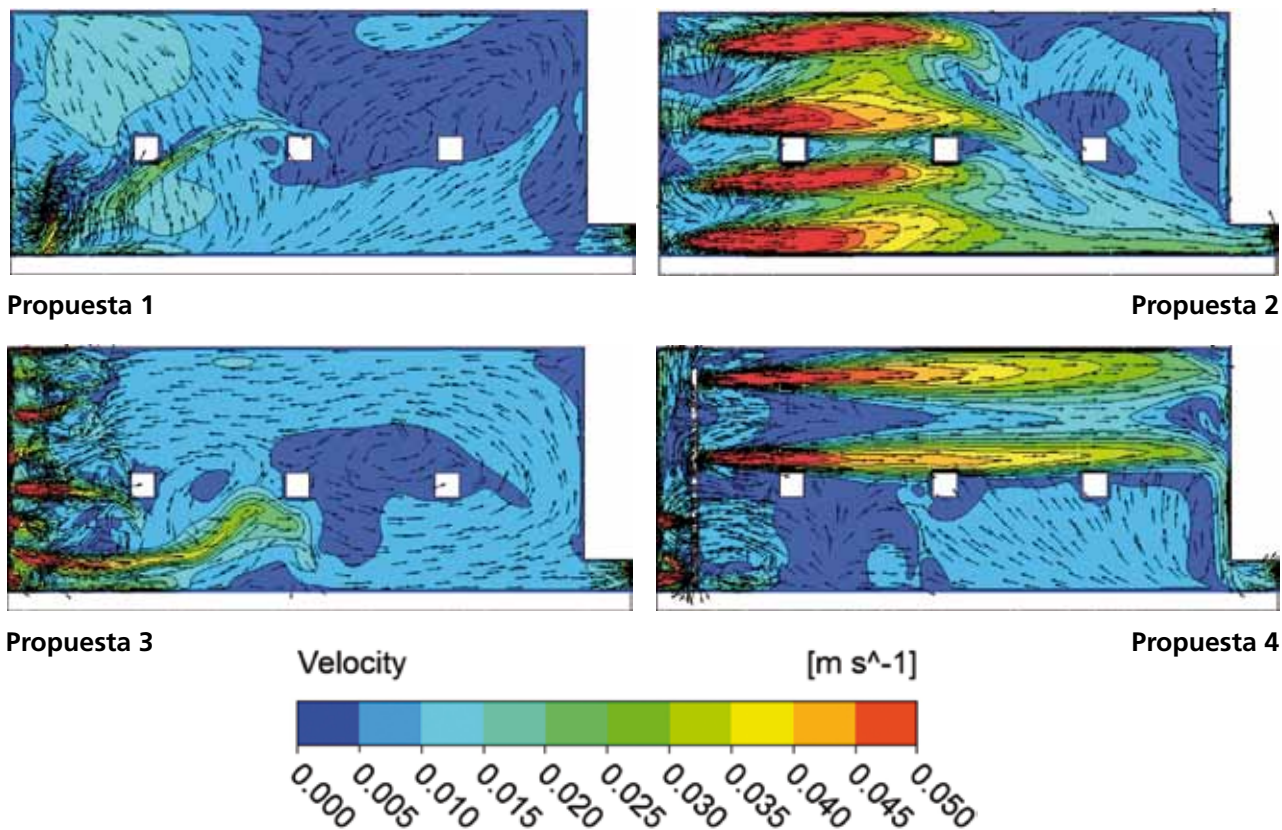




TABLA 1

VALORES MÁXIMOS DE CONCENTRACIÓN DETECTADA Y TIEMPO DE DETECCIÓN DE DICHO MÁXIMO.

Propuesta	Concentración máxima detectada (mg/L)	Tiempo de detección (s)
1	1,25 E-04	1.320
2	2,11 E-04	510
3	7,30 E-05	2.280
4	1,30 E-04	420

la salida, limitando la capacidad de mezclado.

Al analizar las distribuciones de velocidades de las 4 propuestas (**Figura 7**), puede observarse que las propuestas 2 y 4, que son las que tienen boquillas orientadas hacia la salida, presentan caminos preferenciales que unen de forma más directa las entradas con las salidas. Por el contrario, en las propuestas 1 y 3, la energía del flujo de entrada se disipa en mayor medida debido a que impacta contra la pared (propuesta 3) o porque impacta contra la superficie o contra otro flujo de entrada (propuesta 1). De este modo, la energía del flujo se invierte en el mezclado. Por ello, las propuestas 1 y 3 son las que presentan mejores respuestas ante el pulso de nitratos en la entrada.

Los valores de concentración máxima alcanzada y tiempo de detección en la salida a red se presen-

tan en la **Tabla 1**, donde se concluye finalmente que la mejor propuesta es la número 3, puesto que es la que presenta una concentración máxima detectada más baja y un tiempo de detección más elevado.

3.2. RESULTADOS DE LAS SIMULACIONES EN RÉGIMEN DINÁMICO

Tras el cálculo de las simulaciones en régimen dinámico, se han analizado los parámetros clave para determinar cuál es el comportamiento general del modelo. La comparación entre la variación de altura teórica, simulada y obtenida a través del sensor (real) se puede observar en la **Figura 8**.

Se aprecia que el modelo reproduce perfectamente la tendencia de la lámina libre comparados con los valores teóricos y los reales, obtenidos con el sensor. Se observan diferencias que pueden deberse, por

un lado, a las pequeñas variaciones en el área de la lámina libre con respecto a la altura y, por el otro, a pequeñas asimetrías en la distribución del caudal. Cabe recordar que se está simulado uno de los dos depósitos simétricos y es posible que en la realidad el caudal de entrada no se reparta perfectamente al 50% en ambos depósitos y esto produzca esas pequeñas variaciones entre la altura teórica y la obtenida por el sensor. Estas comprobaciones permiten confirmar que los resultados calculados por el modelo dinámico son correctos, y permiten reproducir el comportamiento hidráulico real.

La evolución de nitratos en red proporcionada por el modelo permite extraer información muy interesante del comportamiento del depósito actual. Concretamente, se pueden determinar dos aspectos fundamentales del funcionamiento del tanque: existencia de cortocircuitos y calidad del mezclado. La existencia de los cortocircuitos se hace patente en los escalones que se producen en la curva de concentración de nitratos en la salida de red.

La interpretación de la **Figura 9** es la siguiente: mientras se encuentra activo el caudal de planta, las concentraciones de nitratos que salen por red se equiparan a la concentración media del tanque (las curvas se superponen), indicando que existe

FIGURA 8. Variación real, teórica y simulada de la altura de la lámina de agua.

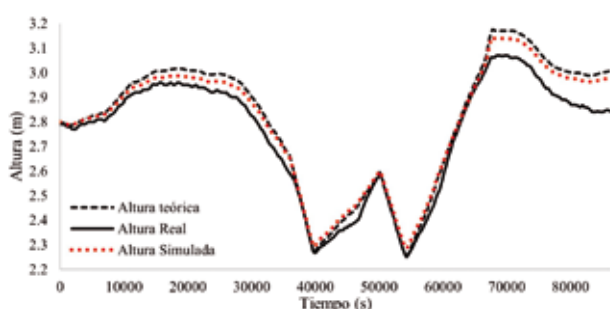
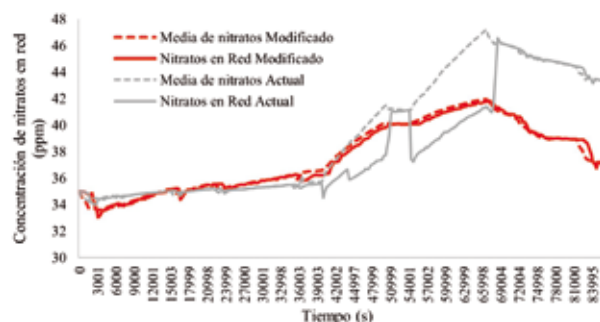


FIGURA 9. Comparación entre la evolución de nitratos en el modelo actual y la propuesta 3.



un buen mezclado y dispersión de los nitratos. En el momento se activa el caudal de consorcio, la curva de concentración media y la de nitratos a la salida comienzan a separarse. La concentración media aumenta (ya que se están introduciendo altas concentraciones de agua bruta por planta), y la de salida, aunque también aumenta, lo hace en un menor grado porque se cortocircuita con el flujo de baja concentración (33 ppm) que entra por la entrada de consorcio. Esta separación entre ambas curvas se interpreta como un mezclado deficiente. También puede observarse que cuando el caudal por consorcio cesa o arranca, se produce un escalón en la curva de nitratos de salida. Esto confirma la existencia de un cortocircuito entre la entrada de consorcio y la salida a red.

Del análisis del depósito actual en régimen dinámico, se puede concluir que el mezclado presenta un potencial de mejora considerable al eliminar el cortocircuito. Utilizando la misma metodología seguida en este apartado, deberá determinarse si el modelo modificado permite subsanar estas deficiencias. Tras las

simulaciones en régimen dinámico del nuevo modelo modificado (obtenido y seleccionado tras las simulaciones en régimen estacionario), se ha presentado la comparativa entre la evolución de las concentraciones de nitratos del modelo actual y el modelo modificado (Figura 9). Puede apreciarse la mejora que supone la nueva configuración propuesta.

En primer lugar, las curvas de concentración media de nitratos y la de concentración en la salida no se separan, lo que indica que existe un buen mezclado. En segundo lugar, no se generan escalones en las curvas cuando se abren o se cierran las diferentes entradas del depósito, por tanto, no hay evidencia de ningún cortocircuito hidráulico en el tanque. En tercer lugar, se puede observar que la curva del modelo modificado es mucho más suave y los valores de concentración máxima alcanzados son menores. En cuarto y último lugar, la concentración de salida para la configuración actual es de 43,3 ppm, mientras que para el caso modificado es de 37,2 ppm. Esto indica que la nueva configuración consigue diluir de forma óptima los diferentes

aportes de nitrato. Las Figuras 10, 11 y 12 muestran la mejora obtenida en la distribución de concentración de nitratos en el tanque.

4. CONCLUSIONES

Tras el análisis de las simulaciones se han obtenido las siguientes conclusiones:

- En el modelo actual existe un cortocircuito hidráulico entre la entrada de consorcio y la salida a red.
- El mejor diseño para eliminar el cortocircuito hidráulico y mejorar la mezcla de corrientes y dispersión de nitratos, es realizar la entrada por varios orificios situados en el extremo opuesto al que se encuentra la salida.
- Las simulaciones en estado estacionario han facilitado la elaboración de un proceso de toma de decisiones en el que se ha seleccionado un modelo óptimo entre varias configuraciones planteadas.
- Se ha optimizado la configuración modificando la entrada mediante una tubería que permite una distribución homogénea a través de 4 orificios de diámetro 55 mm.

FIGURA 10. Distribución de nitratos en planta y perfil en el depósito actual (arriba) y modificado (abajo) para el instante de 45.600 segundos (primera inyección por planta de nitratos procedentes de agua bruta de pozo).

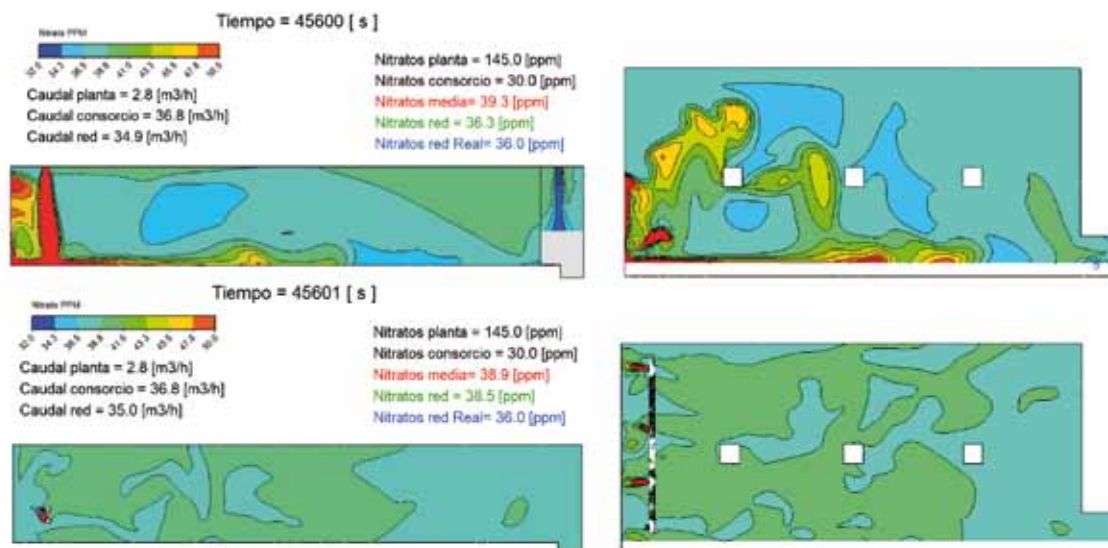




FIGURA 11. Distribución de nitratos en planta y perfil en el depósito actual (arriba) y modificado (abajo) para el instante de 51.000 segundos (instante en el que planta y consorcio están cerradas y solo sale caudal por red).

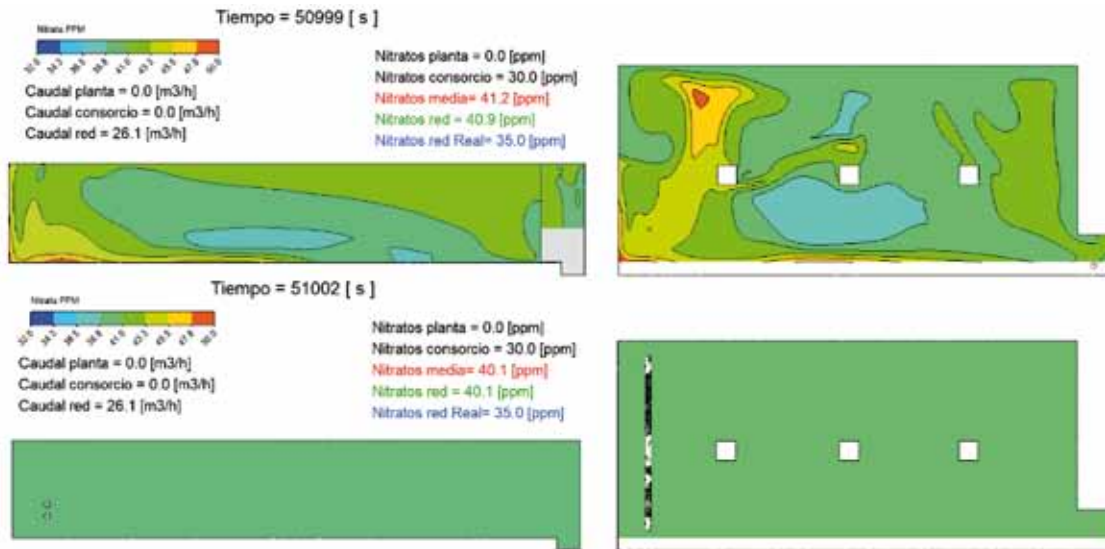
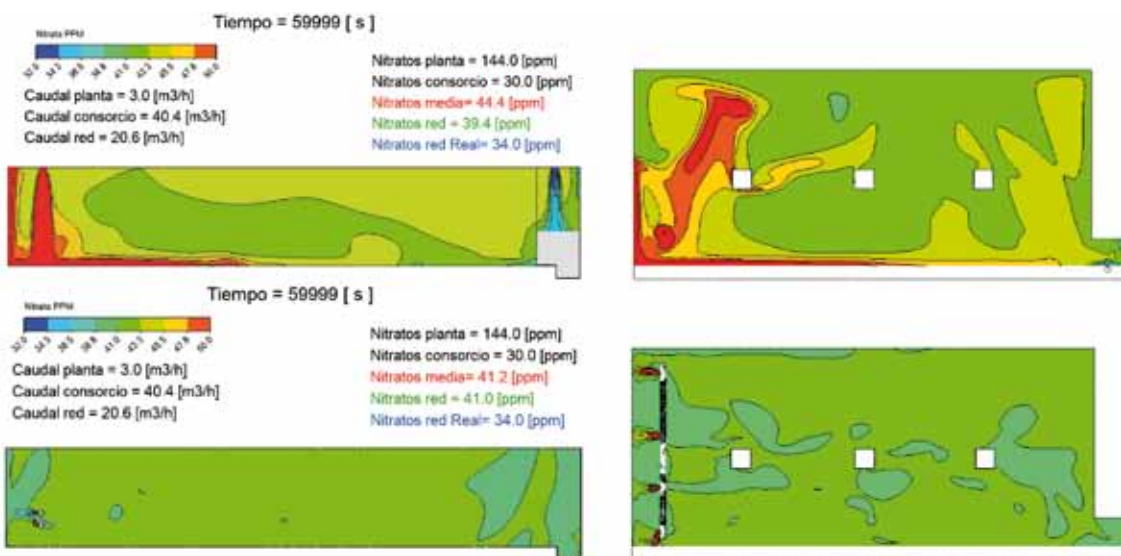


FIGURA 12. Distribución de nitratos en planta y perfil en el depósito actual (arriba) y modificado (abajo) para el instante de 60.000 segundos (segunda inyección por planta de nitratos procedentes de agua bruta de pozo).



- El comportamiento hidrodinámico estimado por las simulaciones presenta una buena correlación con los datos obtenidos de forma experimental (variación de caudales y altura del depósito).

- Las curvas de la evolución de nitratos en la salida del tanque indican que la configuración propuesta permite una mejor dispersión y homogenización de los nitratos de entrada.

Bibliografía

[1] Jianping, Z.; Huck, P.M.; Stubble, G.D.; Anderson, W.B. (2008). Application of a multiphase CFD modelling approach to improve ozone residual monitoring and tracer testing strategies for full-scale drinking water ozone disinfection processes. *Journal of Water Supply: Research and Technology*, págs. 79-92.
 [2] ANSYS CFX Reference Guide (2019).
 [3] Brouckaert, C.J.; Buckley, C.A. (1999). The use of computational fluid dynamics for improving the design and operation of water and wastewater treatment plants. *Water Science and Technology*, núm. 40, págs. 81-89.
 [4] Climent, J.; Basiero, L.; Martínez-Cuenca, R.; Berlanga, J.G.; Julián López, B.; Chiva, S. (2018). Biological reactor retrofitting using CFD-ASM modelling. *Chemical Engineering Journal*, núm. 15, págs. 1-14.

[5] Haiwen, G.; Strenstrom, M.K. (2019). Generalizing the effects of the baffling structures on the buoyancy-induced turbulence in secondary settling tanks with eleven different geometries using CFD models. *Chemical Engineering Research and Design*, núm. 143, págs. 215-225.
 [6] Menter, F.R. (1994). Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications. *AIAA* 32, págs. 1.598-1.605.
 [7] Templeton, M.R.; Hofmann, R.; Andrews, R.C. (2006). Case study comparisons of computational fluid dynamics (CFD) modeling versus tracer testing for determining clearwell residence times in drinking water treatment. *Journal of Environmental Engineering and Science*, págs. 529-536.
 [7] Wols, B. (2011). *Computational fluid dynamics in drinking water treatment*. IWA Publishing.