

# Optimización de los parámetros de funcionamiento de un decantador Superpulsator utilizando técnicas CFD en una ETAP

En el presente trabajo se ha analizado el comportamiento hidrodinámico detallado de un decantador Superpulsator mediante herramientas de simulación computacional de fluidos (CFD). En el estudio se ha analizado el comportamiento bajo diferentes configuraciones de los pulsos, considerando la distribución de sólidos que se produce en su interior, gracias a la introducción de un modelo de sedimentación calibrado mediante ensayos experimentales. De esta manera, se han podido caracterizar diferentes tipologías de pulsos y evaluar su efecto sobre el decantador, para establecer cuál es la configuración que permite mejorar la eficiencia del proceso.

## Palabras clave

Decantador Superpulsator, simulación CFD, modelización, sedimentación.

## OPTIMIZATION OF THE OPERATING PARAMETERS OF A SUPERPULSATOR SETTLER USING CFD TECHNIQUES IN A DWTP

*In this present work, the detail hydrodynamic behaviour of a Superpulsator settler has been analysed using computational fluid dynamics simulation tools (CFD). In the study has been analysed the behaviour under different pulses configurations, considering the solid distribution that is produced inside, thanks to the introduction of a calibrated settling model through experimental essays. In this way, it has been possible to characterize different pulses typologies and evaluate their effects on the settler, to establish which is the configuration that allows improve the efficiency in the process.*

## Keywords

Superpulsator settler, CFD simulation, modelling, settling.

**José Vilarroig Herrera**  
CTO de Hydrodynamic and  
Environmental Services (Hydrens)

**Francisco Javier García Castillo**  
jefe del Departamento de Potabilización  
de Facsa

**Miguel Ortiz Gómez**  
subdirector técnico de Abastecimiento  
de Facsa

**Javier Climent Agustina**  
CEO de Hydrodynamic and  
Environmental Services (Hydrens)

**Esther Soler**  
jefa de planta de la ETAP de Empuriabrava,  
UTE Abastament Consorci Costa Brava  
(Facsa-Calaf)

**Manuel Ortiz Gómez**  
técnico de Potabilización de Facsa



## 1. INTRODUCCIÓN

En el decantador Superpulsator se produce un tipo de decantación que combina las ventajas de un lecho de fangos de gran concentración mantenido en expansión por pulsaciones, y una recirculación interna de los fangos floculados producida por una red de lamelas inclinadas situadas dentro del lecho de fangos. La instalación de estas lamelas propicia el fenómeno llamado decantación superacelerada, y el decantador Pulsator tradicional pasa a convertirse en un Superpulsator (Hamzah, 2010). La decantación superacelerada permite conservar una concentración del lecho de fangos igual que la de un Pulsator, pero trabajando a velocidades ascensionales muy superiores, obteniendo grandes rendimientos con elevados caudales.

La clave para lograr un correcto funcionamiento y un buen rendimiento del decantador durante su operación es el ajuste de los ciclos pulsantes. Actualmente, no existe un criterio definido para la configuración de los ciclos pulsantes y la bibliografía disponible es muy escasa. Debido a esto, el ajuste de los pulsos se realiza siguiendo las recomendaciones del fabricante durante su instalación y puede permanecer inalterado durante años, incluso décadas.

En el presente documento se exponen los resultados obtenidos tras el análisis del decantador Superpulsator de la ETAP de Empuriabrava. El estudio se ha realizado a través de un modelo informático sobre el que se ha analizado en detalle el comportamiento fluidodinámico en el interior del decantador, considerando la sedimentación de los sólidos de acuerdo a una curva de sedimentación previamente calculada mediante ensayos experimentales (Vesilind, 1968; Takács, 1991). En el estudio

» El principal objetivo de este estudio consiste en reproducir el comportamiento hidráulico del decantador Superpulsator para entender su funcionamiento en detalle y así poder plantear mejoras que permitan optimizar su operación en una planta potabilizadora

se han considerado los pulsos producidos en la cámara de vacío, así como el efecto de las lamelas que se encuentran en el interior del decantador.

El desarrollo del modelo informático del decantador ha permitido no solo conocer el comportamiento general del sistema, sino también disponer de una base sólida sobre la que proponer cambios encaminados a mejorar el funcionamiento y parámetros de operación del decantador para maximizar su rendimiento ante cualquier situación (Ekama *et al.*, 1997). El proceso de modelización del decantador se ha realizado con ayuda de herramientas CFD (*computer fluid dynamics*), concretamente con el *software* ANSYS 19.2. De esta forma se puede determinar el comportamiento del decantador tanto en régimen estacionario como en régimen dinámico y analizar el comportamiento hidrodinámico en función de las diferentes condiciones de contorno que pueden encontrarse durante su funcionamiento real.

Es importante mencionar que los submodelos utilizados en el presente estudio han sido validados con datos experimentales obtenidos a través de campañas de medición, utilizando un velocímetro de efecto Doppler y analizando diferentes muestras en el interior del decantador. La validación experimental es clave para garantizar la fiabilidad y robustez de los modelos computacionales utilizados.

## 2. OBJETIVO

El principal objetivo del estudio consiste en reproducir el comportamiento hidráulico del decantador Superpulsator, para entender su funcionamiento en detalle y poder, de esta forma, plantear mejoras que permitan optimizar su operación en planta. Es importante que los resultados obtenidos a través de las simulaciones CFD puedan implementarse de manera práctica en el sistema real. Por ello, se ha definido de manera muy concreta las actividades que deben abordarse con la ejecución del estudio:

- Conocer el funcionamiento del decantador mediante su modelización a escala real en CFD.
- Conocer la distribución de caudal en las tuberías de reparto a través de las cuales se introduce el flujo de agua al decantador.
- Análisis de la influencia de los pulsos de carga y descarga de la cámara de vacío sobre el funcionamiento general del decantador.
- Estudio del comportamiento de las lamelas situadas sobre las tuberías de reparto, para determinar su correcto funcionamiento en el proceso de decantación
- Justificar el ahorro energético que se produce al trabajar en régimen continuo (sin pulsos) cuando no hay una situación de riadas.

### 3. METODOLOGÍA PARA SIMULAR EL MODELO CFD

El desarrollo del proyecto se divide en tres submodelos diferentes en función de la parte del decantador que desea analizarse: zona de la cámara de vacío y distribución; tuberías de distribución y orificios; y zona de las lamelas y los concentradores. A su vez, en cada uno de los submodelos se han considerado diferentes condiciones de funcionamiento para analizar el efecto de diversos parámetros tales como el caudal de entrada, o las características de los ciclos de pulsación.

En primer lugar, se ha realizado la modelización de la campana central y las tuberías de entrada a la balsa del decantador (submodelo 1). Se presenta un enfoque centrado en la influencia de los vectores de velocidad, la presencia de turbulencias en el flujo y la distribución de caudales por las tuberías. En esta parte del estudio, se considera el comportamiento por separado durante las diferentes fases del ciclo de pulsación (llenado y vaciado).

También se ha realizado un submodelo (submodelo 2) cuyo dominio engloba las tuberías de distribución con los orificios. En este submodelo se han analizado los diferentes ciclos pulsantes (en función del caudal de entrada) y se ha analizado, en régimen transitorio, la distribución de velocidades y velocidad media de deformación, así como la agitación producida en cada una de las situaciones.

Finalmente, se ha procedido a la modelización de la parte restante del decantador (submodelo 3) donde, a partir de la implementación de los parámetros anteriores, se ha llevado a cabo el análisis de la influencia del modelo bifásico de sedimentación en estado transitorio, para el pulso

de carga y descarga de la cámara de vacío. En este tercer submodelo se introducen los parámetros de caracterización del fango resultantes de la realización de unos ensayos experimentales en planta. El enfoque de los resultados se centra en la distribución de las concentraciones másicas de sólidos suspendidos y velocidades, así como en la evolución de la altura del manto de fangos en el interior del decantador y el efecto hidrodinámico producido por las lamelas.

### 4. DESARROLLO DEL MODELO DE SIMULACIÓN COMPUTACIONAL DE FLUIDOS (CFD)

#### 4.1. CARACTERÍSTICAS Y CONDICIONES DE CONTORNO DEL SUBMODELO 1

El dominio del submodelo 1 comprende la cámara de vacío, el canal de distribución y el inicio de las tuberías de distribución tal y como puede verse en la **Figura 1**. El volumen total del dominio simulado es de 51,6 m<sup>3</sup> y se han realizado dos geometrías diferentes en función de si las condiciones de simulación consideran un ciclo pulsante o un ciclo continuo. Para los ciclos pulsantes, se ha considerado una altura de lámina de agua en el interior de la cámara de vacío de 8,05 m, a la que se le ha añadido 0,44 m correspondientes a

la elevación que se produce durante el llenado.

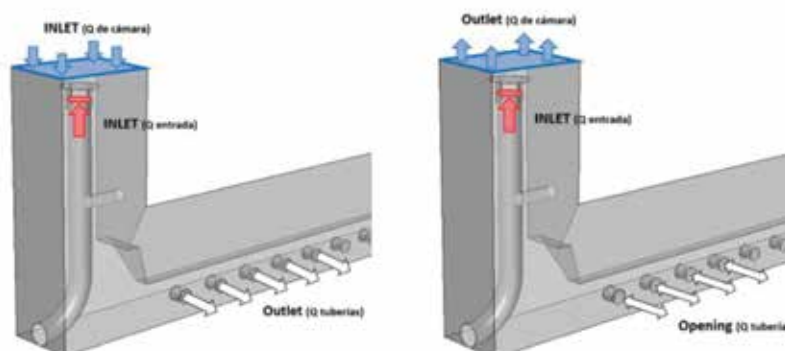
Las simulaciones del submodelo 1 consideran dos situaciones de funcionamiento diferentes: sin ciclos de pulsación (en continuo) y con ciclos de pulsación. En esta última situación se ha considerado el momento en el que se está operando en la fase de vaciado de la cámara de vacío y en la fase de llenado de esta. Además, se han establecido 3 caudales diferentes: máximo (0,18 m<sup>3</sup>/s), verano (0,0875 m<sup>3</sup>/s) e invierno (0,0325 m<sup>3</sup>/s) para cada situación.

En la **Figura 1** se puede observar la existencia de dos entradas de flujo (caudal de cámara y caudal de entrada) y una salida correspondiente a las tuberías. Sin embargo, para simular la fase de llenado, se ha utilizado una única entrada (caudal de entrada) y una única salida (caudal de cámara).

#### 4.2. CARACTERÍSTICAS Y CONDICIONES DE CONTORNO DEL SUBMODELO 2

El dominio de este submodelo consiste en una 'rebanada' de 400 mm de espesor y 2 m de altura, lo que supone un volumen total de 15,3 m<sup>3</sup>. Se han considerado 2 orificios al tresbolillo en cada una de las 20 tuberías de salida, es decir, 40 orificios en total. Las lamelas no se han representado en este modelo puesto

**FIGURA 1.** Condiciones de contorno utilizadas en el submodelo 1.





que la altura del dominio se encuentra justo por debajo de las mismas.

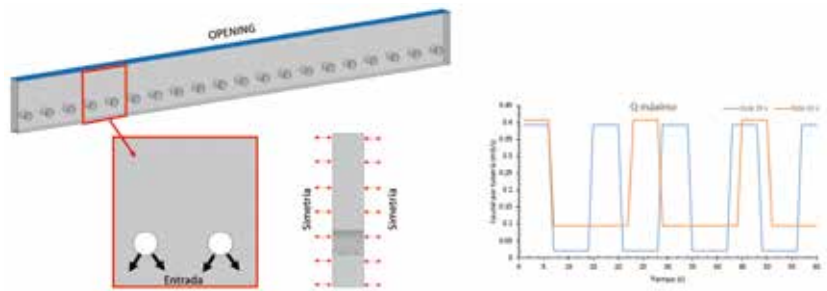
En el modelo ha sido necesario establecer los valores de caudal de entrada por los orificios como una función que presenta variaciones a lo largo del tiempo (**Figura 2** derecha). Estas condiciones de caudal se han establecido para las entradas del submodelo que, en este caso, se corresponden a los orificios de las tuberías de distribución. Además, en la superficie superior del modelo se ha establecido una condición de 'Opening' para permitir la entrada y salida de flujo en función de la situación.

#### 4.3. CARACTERÍSTICAS Y CONDICIONES DE CONTORNO DEL SUBMODELO 3

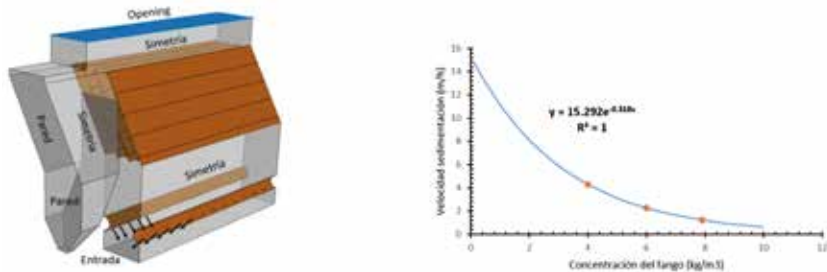
El dominio utilizado para realizar la simulación del submodelo 3 se corresponde a una zona central de decantador, concretamente a una veinteaava parte de este. Este volumen se estima en 25,8 m<sup>3</sup> y engloba dos medias tuberías de distribución, 3 lamelas y una sección del concentrador. Se ha intentado respetar la simetría existente para conseguir que el comportamiento del submodelo sea lo más parecido a lo que ocurre en ese dominio del decantador en la realidad.

En este submodelo en particular, se ha introducido un modelo de sedimentación para considerar el comportamiento del fango en el interior del decantador. Para ello se ha utilizado la expresión de la velocidad de sedimentación obtenida gracias a los ensayos experimentales (**Figura 3** derecha). Se han estipulado unas condiciones de simetría para considerar que las zonas de contacto de un dominio con su sucesivo dominio simétrico sean idénticas y de esta forma poder simplificar el submode-

**FIGURA 2.** Condiciones de contorno utilizadas en el submodelo 2 (izquierda) y curva de ciclos pulsantes de caudal máximo, utilizada para la condición de entrada al sistema (derecha).



**FIGURA 3.** Condiciones de contorno utilizadas en el submodelo 3 (izquierda) y curva de sedimentación experimental utilizada en el modelo (derecha).



lo. La parte superior se ha considerado como un 'Opening' por donde el fluido puede salir o entrar libremente y se ha establecido la entrada al sistema a través de los orificios de la tubería de distribución.

## 5. RESULTADOS

Tras simular y analizar la información proporcionada por cada uno de los submodelos, se ha elaborado un diagnóstico del funcionamiento del decantador Superpulsator, mostrando posibles anomalías o comportamientos mejorables y proporcionando soluciones alternativas que permitan mejorar el rendimiento del decantador a corto o medio plazo.

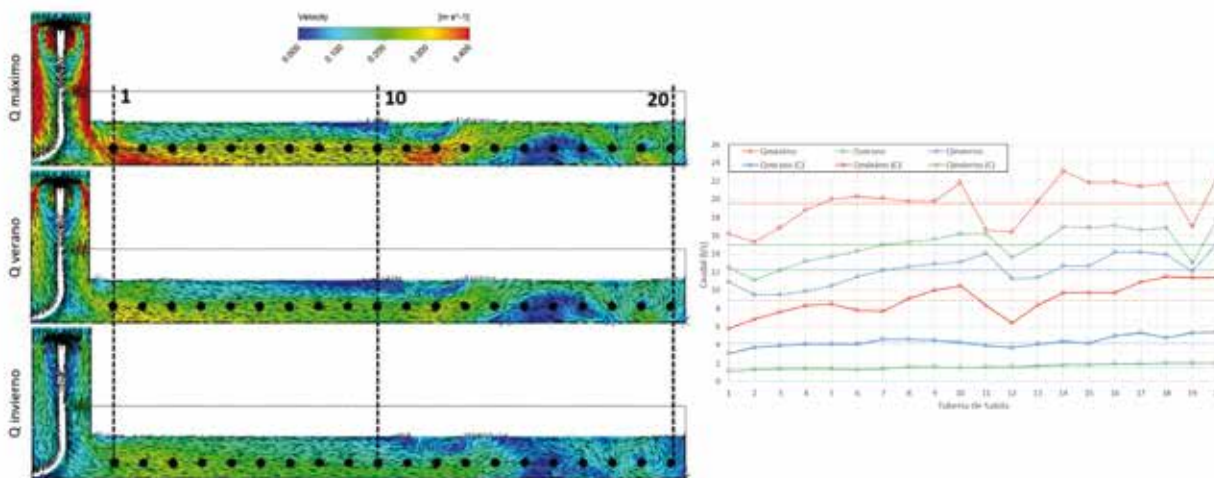
### 5.1. RESULTADOS OBTENIDOS EN EL SUBMODELO 1

Los resultados del submodelo 1 han permitido determinar la distribución de caudales a lo largo de las tuberías

de distribución, en función del caudal de funcionamiento del sistema y del tipo de ciclo pulsante utilizado.

En cuanto al funcionamiento en continuo y fase de vaciado, durante esta fase todo el caudal acumulado en la cámara de vacío se desplaza hacia el canal de distribución. Al principio del canal, la velocidad es más elevada y va perdiendo intensidad a medida que el fluido va saliendo a través de las tuberías (**Figura 4** izquierda). Cuando el decantador funciona en continuo (sin pulsos), se puede observar cómo las primeras tuberías reciben menos caudal que aquellas situadas al final del canal de distribución. Esto es debido a la intensa velocidad que existe al principio del canal y que produce grandes turbulencias en las zonas de entrada a las tuberías. De esta manera, se genera un perfil de velocidades muy heterogéneo justo en la entrada de

**FIGURA 4.** Distribución de velocidades durante la fase de vaciado con pulsos de 15 segundos (izquierda) y su distribución de caudales para los pulsos de 15 segundos y funcionamiento en continuo (derecha).



las tuberías y dificulta la succión del fluido. Todo lo expuesto anteriormente es directamente aplicable al comportamiento que se tiene durante la fase de vaciado, únicamente con la diferencia de los efectos de remolinos y heterogeneidades producidas por un caudal de salida más elevado.

En cuanto al funcionamiento durante fase de llenado, en esta etapa pueden sucederse diferentes comportamientos. Por ejemplo, es posible que el caudal de entrada sea suficientemente elevado como para que parte de dicho caudal llene la campana, y el sobrante escape a través de las tuberías de distribución. Sin embargo, en determinadas si-

tuaciones, el caudal de entrada no es suficiente para suplir la demanda necesaria para llenar la campana y se succiona caudal del interior del decantador hacia el canal de distribución a través de los orificios situados al tresbolillo. Esto ocurre principalmente cuando se dan pulsos cortos de 15 segundos o cuando el caudal de entrada al decantador es reducido (caudal invierno).

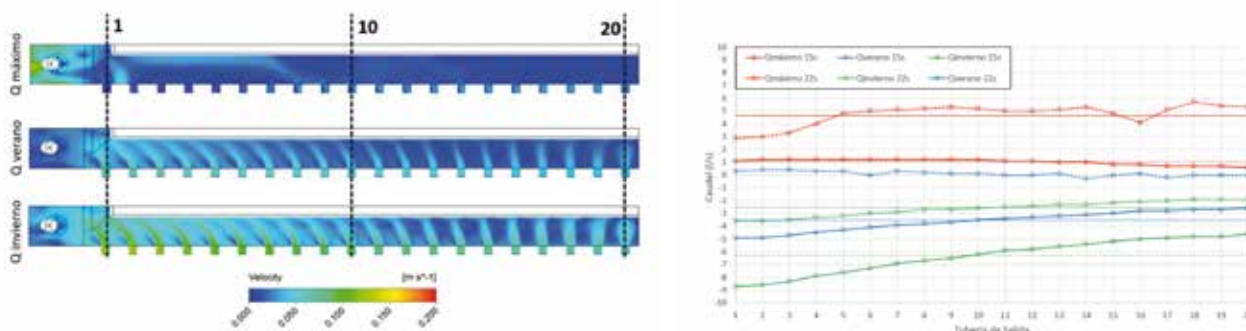
En las imágenes y gráfica de la **Figura 5** se puede observar cómo para una situación a caudal máximo con un ciclo de pulsos de 15 segundos, el fluido que entra en el interior de la cámara de vacío es suficiente como para producir el llenado de esta y, por tanto, existe un

flujo de agua que se desplaza hacia el canal de distribución y sale por los orificios. Sin embargo, cuando el caudal de entrada a la cámara de vacío disminuye, como es el caso de las situaciones a caudal de verano y de invierno, es necesario introducir caudal desde los orificios hacia el interior del canal de distribución, para poder llenar la cámara de vacío en el tiempo establecido.

### 5.2. RESULTADOS OBTENIDOS EN EL SUBMODELO 2

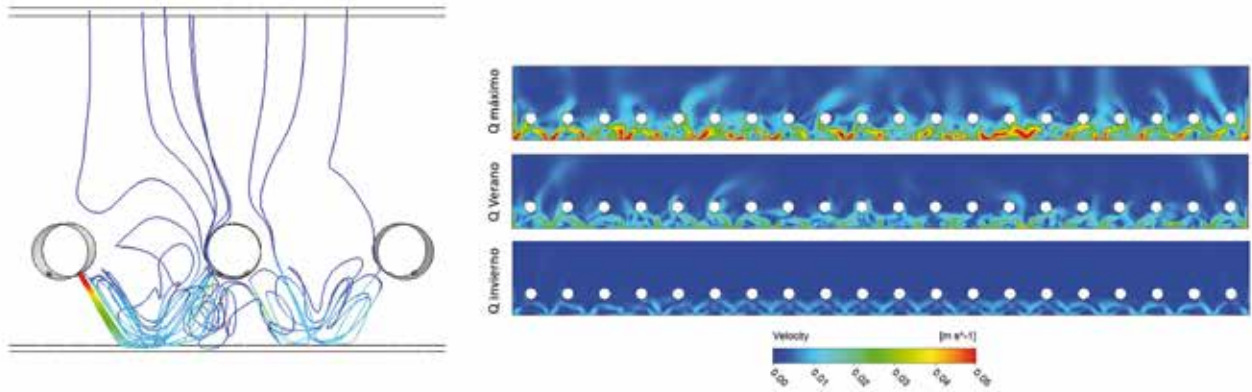
La finalidad del submodelo 2 es analizar de forma detallada el comportamiento de los diferentes pulsos utilizados en el decantador, así como la situación en continuo. Los

**FIGURA 5.** Distribución de velocidades durante la fase de llenado con pulsos de 15 segundos (izquierda) y su distribución de caudales para los pulsos de 15 y 22 segundos y funcionamiento en continuo (derecha).





**FIGURA 6.** Distribución de velocidades en el plano central para el funcionamiento en régimen continuo.



pulsos se han analizado en régimen transitorio para poder cuantificar el mezclado y las distribuciones de velocidad con precisión (**Figura 6**).

Se pueden distinguir dos zonas de agitación claramente diferenciadas en la salida de las tuberías de distribución. Por un lado, se encuentra la parte por debajo de la línea central de las tuberías donde concurren los jets de entrada de todos los orificios. En estas zonas la agitación es intensa y constante, tanto en el propio plano de los orificios, como en la zona intermedia a los mismos. En el caso de un caudal reducido como es la situación en invierno, la agitación en la parte central se observa más debilitada, lo que puede favorecer la aparición de mayores concentraciones de fango en esa zona durante el funcionamiento.

Por otro lado, se tiene la zona justo por encima de la línea central

de las tuberías. Se observa cómo durante el funcionamiento con caudales elevados (máximo o verano) es posible que se produzcan zonas con velocidades localmente elevadas, lo que dificulta la deposición del sedimento y lo fuerza a pasar a través de las lamelas. En la situación de caudal bajo (invierno), las velocidades en esta zona son muy bajas y prácticamente toda la agitación se reduce a la zona más cercana a la solera y a los jets. Tras analizar en detalle los parámetros de velocidad media y de velocidad de deformación en la zona de agitación más intensa (por debajo de las tuberías de distribución), se observa que cuando se opta por un funcionamiento en continuo (sin pulsos), el valor tanto de la velocidad media, como de la velocidad de deformación (*shear strain rate*), es inferior en todo momento al que se consigue con los pulsos. En este

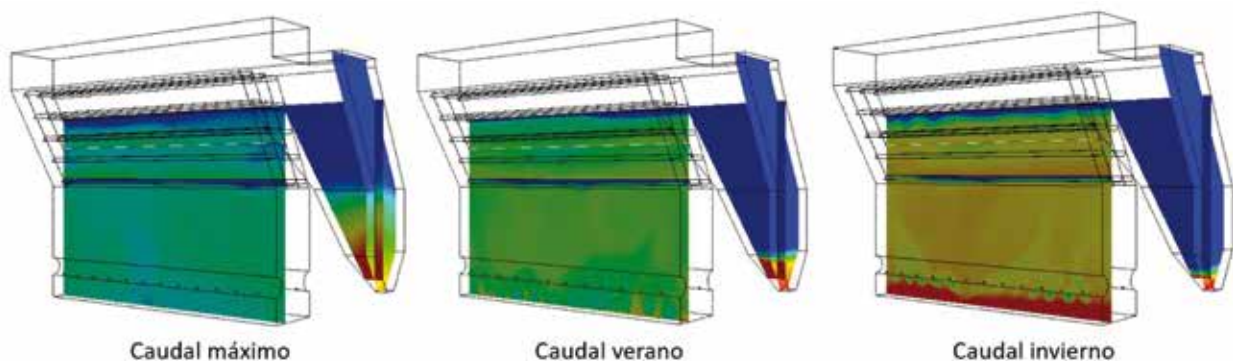
sentido, cuanto menor es el caudal (caudal de invierno), más se acrecienta esta diferencia.

### 5.3. RESULTADOS OBTENIDOS EN EL SUBMODELO 3

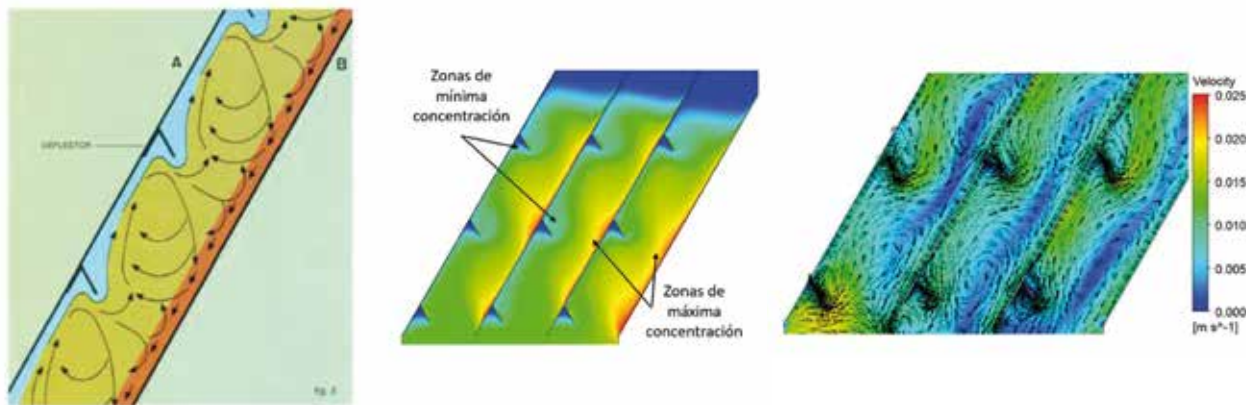
La resolución de este sistema es más compleja que los casos anteriores debido al tamaño del dominio y a que obtiene información no solo del comportamiento hidrodinámico de las lamelas de interior del decantador, sino también del comportamiento del sedimento.

En primer lugar, se ha analizado la evolución del manto de fango durante un funcionamiento en continuo del decantador (sin pulsos). Dado que esta es la situación habitual de funcionamiento, se han analizado los gradientes de concentración en función del caudal de entrada. Tal y como se muestra en las imágenes de la **Figura 7**, existe una

**FIGURA 7.** Distribución de sólidos durante el funcionamiento a diferentes caudales en régimen continuo.



**FIGURA 8.** Detalle del comportamiento del flujo en las lamelas.



mayor concentración de sedimentos en aquellas situaciones en las que el caudal de entrada es más reducido. De forma estimativa, las concentraciones presentes entre las lamelas y las tuberías de distribución en la situación de caudal de invierno son un 28% superiores con respecto a la situación de caudal de verano y un 54% superiores con respecto a la situación de caudal máximo.

Respecto a la distribución de concentraciones en las lamelas, el comportamiento simulado en todas las situaciones se adecúa al comportamiento teórico mostrado en la **Figura 8**. Se puede observar cómo se produce una mayor concentración en la zona lisa de las lamelas por donde el flujo desciende mientras que la zona ascendente donde se

encuentran los deflectores, presenta concentraciones más bajas.

También se ha analizado el funcionamiento del decantador utilizando los ciclos pulsantes de 15 segundos con unos caudales correspondientes a verano e invierno. En términos generales, se obtiene una agitación más energética cuando se funciona con ciclos pulsantes (**Figura 9**). Esto también se traduce en una dilución de la concentración que se obtiene en el interior del decantador donde la concentración de sólidos disminuye un 3% con respecto a la que se obtiene en un ciclo pulsante.

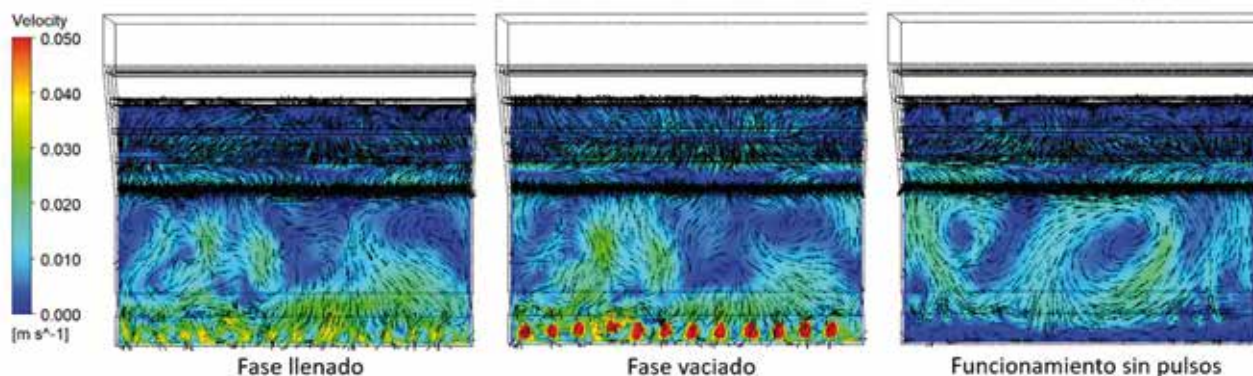
#### 5.4. VALIDACIÓN MEDIANTE ENSAYOS EXPERIMENTALES

La validación experimental se llevó a cabo realizando dos tipos de medi-

ciones: medida de las velocidades a diferentes profundidades; y toma de muestras a diferentes profundidades. Para llevar a cabo las mediciones de velocidad se ha utilizado un velocímetro Nortek de alta resolución de tecnología acústica Doppler (ADV). Gracias a este dispositivo, es posible determinar de manera muy precisa la velocidad en el interior del decantador con una precisión por debajo de 1 mm/s. Así mismo, la toma de muestras se ha llevado a cabo utilizando una bomba portátil que puede ser de 24 V, la cual puede sumergirse para obtener muestras del fondo y a diferentes profundidades.

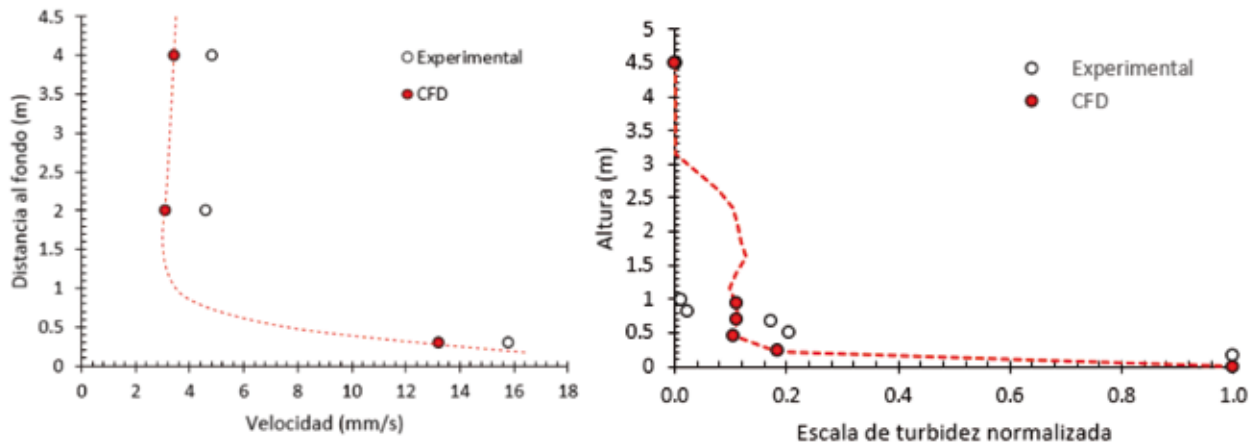
Las medidas proporcionadas por el CFD resultan ser inferiores a las proporcionadas por el Vectrino. Esta variación puede ser explicada por

**FIGURA 9.** Distribución de velocidad durante la fase de llenado, vaciado y funcionamiento sin pulsos para un caudal de entrada correspondiente a invierno.





**FIGURA 10.** Comparativa de velocidades y concentraciones obtenidas experimentalmente con las predichas por CFD.



la diferencia de caudales existentes entre el modelo simulado y la situación de caudal de entrada en planta el día de las mediciones (**Figura 10** izquierda). En cuanto al gradiente de concentración, se puede observar que el modelo CFD también predice de manera correcta el gradiente de concentraciones que se produce en la zona más cercana a la solera del decantador (**Figura 10** derecha).

## 6. CONCLUSIONES

A continuación, se presentan las conclusiones obtenidas tras la simulación y análisis de los tres submodelos del Superpulsator. De manera global, puede concluirse que:

- Durante el funcionamiento a ciclos, las mayores heterogeneidades en las tuberías de distribución se dan durante la fase de vaciado a caudales elevados. Así

mismo, al funcionar sin pulsos se evita la reentrada de flujo hacia el interior del canal de distribución.

- Para evitar la reentrada de flujo hacia el interior del canal de distribución, se aconseja utilizar ciclos más largos de 22 segundos durante operaciones con caudales bajos.
- Durante los flujos pulsantes, se consigue una mayor dilución de los sólidos. La diferencia de agitación entre un funcionamiento a ciclos y un funcionamiento continuo, puede ser relevante si se tiene una situación de poco caudal. Aun así, para la calidad habitual del agua bruta a tratar, dicha agitación no llega a ser relevante, y se puede trabajar sin pulsos obteniéndose así un mejor ratio energético en la planta.

- La calidad del clarificado es adecuada, quedando el manto de fangos lejos de las tuberías de salida.
- La validación del modelo en términos de comportamiento hidráulico y distribución de sólidos es satisfactoria. De esta manera, el modelo queda disponible para simular otras situaciones en el futuro.

### Bibliografía

- [1] Hamzah, A.; Zalina, N.; Halim, A. (2010). Life cycle impact assesment (LCIA) of potable water production in Malaysia: A comparison among different technology used in water treatment plant. *Environment Asia*, núm. 3(1), págs. 95-102.
- [2] Vesilind, P.A. (1968). Design of prototype thickeners from batch settling tests. *Water Sewage Works*, núm. 115, págs. 302-307.
- [3] Takács, I.; Patry, G.G.; Nolasco, D. (1991). A dynamic model of the clarification thickening process. *Water Res.*, núm. 25, págs. 1.263-1.271.
- [4] Ekama, G.A.; Barnard, J.L.; Günthert, F.W.; Krebs, P.; McCorquodale, J.A.; Parker, D.S.; Wahlberg, E.J. (1997). *Secondary settling tanks: theory, modelling, design and operation*. IAWQ, London.
- [5] Decantador Superpulsator. En: Degremont. *Manual Técnico del Agua*. 4ª ed. Bilbao: Grafo, 1979. 1.216 p. ISBN: 84-300-1651-1.
- [6] Design of municipal wastewater treatment plants. *WEF Manual of Practice*, nº 8. ASCE Manuals and Reports on Engineering Practice nº 76 Fifth Edition. McGraw-Hill, United States of America, 2nd edition (2005).
- [7] De Clercq, B. (2003). *Computational fluid dynamics of settling tanks: development of experiments and rheological, settling and scraper submodels*. PhD Thesis, University of Gent, Belgium.
- [8] Lin, S.D. (2011). *Water and wastewater calculations manual*. McGraw-Hill, New York.

» En el estudio se elabora un diagnóstico del funcionamiento del decantador Superpulsator, mostrando posibles anomalías o comportamientos mejorables y proporcionando soluciones alternativas que permitan mejorar el rendimiento del decantador a corto o medio plazo