

# Análisis numérico del reactor biológico de la Estación Depuradora de Aguas Residuales de Roldán, Lo Ferro y Balsicas (España)

## *Numerical analysis of the biological reactor of the Wastewater Treatment Plant of Roldán, Lo Ferro and Balsicas (Spain)*

(Recepción 18/01/2021; Aceptación 13/07/2021)

Ros-Bernal A.<sup>1</sup>; Carrillo J.M.<sup>1</sup>; García J.T.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Caminos, Canales y Puertos y de Ingeniería de Minas  
Universidad Politécnica de Cartagena (UPCT)  
Paseo Alfonso XIII, 52, 30203, Cartagena, España  
Teléfono: +34 868071014  
Email: alicia.ros@edu.upct.es

**Resumen.** El estudio hidrodinámico de un reactor biológico permite detectar zonas muertas o caminos preferenciales de flujo que reflejan deficiencias en su funcionamiento. Optimizar el diseño de estas unidades en un modelo numérico de dinámica de fluidos computacional (CFD) antes de la implementación a gran escala puede aumentar sustancialmente la eficiencia del proceso de depuración. El presente estudio tiene por finalidad evaluar la hidrodinámica de la cámara anaerobia del reactor biológico de la Estación Depuradora de Aguas Residuales de Roldán, Lo Ferro y Balsicas (España) para un caudal de diseño de 2,750 m<sup>3</sup>/día. En el análisis, se ha investigado la influencia del modelo de turbulencia y del tamaño de malla mediante un modelo numérico tridimensional elaborado en FLOW-3D.

**Palabras clave.** Dinámica de fluidos computacional (CFD); Estación Depuradora de Aguas Residuales (EDAR); hidrodinámica; reactor biológico.

**Abstract.** The hydrodynamic study of a biological reactor allows the detection of dead zones or preferential flow paths that reflect hydrodynamic deficiencies in its operation. Optimizing the design of these units with a Computational Fluid Dynamics (CFD) numerical model before their large-scale implementation may increase substantially the efficiency of the purification process. The purpose of this study is to evaluate the hydrodynamic behavior of the anaerobic chamber of the biological reactor of the Roldán, Lo Ferro and Balsicas Wastewater Treatment Plant (Spain) for the design flow of 2,750 m<sup>3</sup>/day. The influence of the turbulence model and the mesh size have been investigated by means of a three-dimensional numerical model carried out in FLOW-3D.

**Keywords.** Biological reactor; Computational fluid dynamics; hydrodynamic; Wastewater Treatment Plant (WWTP).

## 1. Introducción

La dinámica de fluidos computacional (CFD) permite obtener una visión más profunda de los procesos de depuración de una Estación Depuradora de Aguas Residuales (EDAR). Los trabajos acometidos hasta ahora evidencian la influencia de la geometría del reactor biológico en el patrón de flujo, motivo por el cual la modelación hidrodinámica ha ganado relevancia en la optimización de diseños (Karpinska & Bridgeman, 2016).

Para el dimensionamiento de estas unidades, tradicionalmente se ha atendido a parámetros de entrada como el caudal, la carga másica, la demanda bioquímica de oxígeno al quinto día, la concentración de sólidos en suspensión y el tiempo de residencia celular, tratando de determinar el tiempo de retención hidráulico (TRH) con el que se consiguen alcanzar niveles adecuados en el proceso de depuración para la materia orgánica y los nutrientes (nitrógeno y fósforo).

El tiempo de retención hidráulico es el tiempo que transcurre desde que una unidad de fluido ingresa en

el reactor biológico hasta que logra abandonar el mismo. Se define como:

$$TRH = \frac{Volumen}{Caudal} \quad (1)$$

El análisis tradicional parte de la hipótesis de que se produce una mezcla homogénea del fluido, sin estratificación, y, a pesar de que este procedimiento es empleado en la selección de las dimensiones del reactor biológico, puede presentar grandes deficiencias al no contemplar el comportamiento hidráulico real, razón por la cual, no se logran los rendimientos esperados en multitud de ocasiones, poniéndose de manifiesto el interés que suscita el análisis hidráulico.

Dicho análisis proporciona información relativa a la distribución de velocidades del fluido, la distancia recorrida y el tiempo de retención hidráulico, posibilitando la detección de zonas muertas, cortocircuitos hidráulicos o caminos preferenciales que disminuyen la eficacia del proceso de depuración. A su vez, facilita la propuesta de alternativas geométricas con las que se logre evitar este comportamiento anómalo del flujo.

La definición de zona muerta es susceptible de diversas interpretaciones en simulaciones CFD. Vesvikar & Al-Dahhan (2005) consideran como zona muerta todas aquellas regiones con una velocidad menor al 5% de la velocidad máxima. Sin embargo, Wu & Chen (2008) modifican esta definición y señalan que las zonas muertas se localizan en regiones con velocidades inferiores a 0.001 m/s.

## 2. Material y métodos

### 2.1. Descripción del reactor biológico

El reactor biológico de la Estación Depuradora de Roldán, Lo Ferro y Balsicas dispone de dos líneas de tratamiento compuestas por tres cámaras de volumen total 6,489.5 m<sup>3</sup>, con la siguiente distribución de dicho volumen: zona anaerobia 10%, zona anóxica 20% y zona óxica 70% (Fig. 1). La dimensión transversal y la altura del reactor son constantes para toda la cámara, 20 m de ancho y 5.71 m de alto, respectivamente. La longitud de la cámara anaerobia es de 6.4 m, mientras que la longitud de la cámara anóxica y óxica son 12.8 m, y 45.4 m, respectivamente. En el muro inicial de la cámara anaerobia se ubica la entrada al reactor mediante una sección de 0.3 x 0.3 m<sup>2</sup>. Los muros que materializan la separación entre las distintas zonas presentan dos orificios de sección 0.2 x 0.4 m<sup>2</sup> en la parte inferior, permitiendo la comunicación de las cámaras a través del fondo. No existe vertido superior entre cámaras para el caudal de diseño.

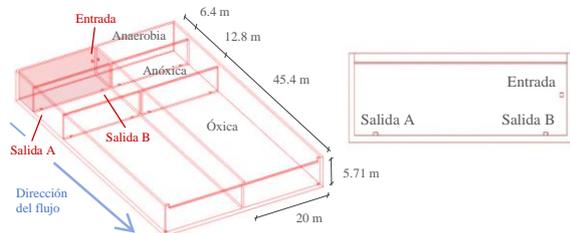


Figura 1. Geometría del reactor: vista 3D (izq) y vista frontal (dcha). (Ros-Bernal *et al.*, 2020).

### 2.2. Modelo numérico

El modelo numérico tridimensional a escala real de la cámara anaerobia se ha generado en FLOW-3D, resolviendo las ecuaciones de Navier-Stokes para el flujo a través del método de diferencias finitas. Este método de discretización espacial se basa en las propiedades del desarrollo de Taylor y en la aplicación directa de la definición de derivada. En los nodos de la malla las ecuaciones son aproximadas por el desarrollo de la serie de Taylor, obteniéndose como resultado una ecuación algebraica por nodo que tiene como incógnita el valor de la variable en ese nodo y en nodos vecinos.

Se emplea una malla estructurada de celdas rectangulares para definir el dominio computacional de la cámara anaerobia, estudiando distintos tamaños de malla, un tamaño de malla más grueso de 0.6 m, otro intermedio de 0.5 m, y el tamaño de malla más

fino de 0.4 m, y bloques de malla anidados con tamaño de malla de 0.1 m, situados en los orificios de salida y de entrada al modelo (Fig. 2).

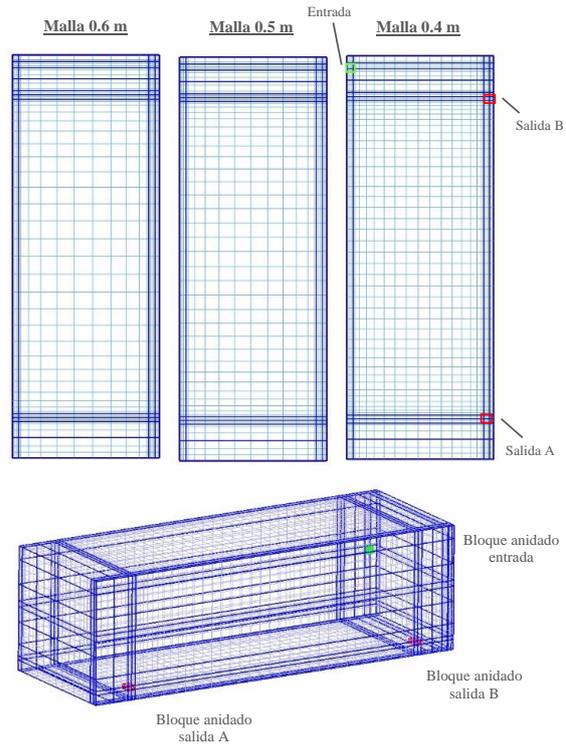


Figura 2. Vista en planta de la malla para tamaños de 0.6 m, 0.5 m y 0.4 m (sup) y vista 3D de la malla general de 0.4 m y los bloques anidados en la entrada y las salidas de 0.1 m (inf).

La condición de contorno para la entrada es de tipo caudal constante e igual a 0.032 m<sup>3</sup>/s, lo que se corresponde con el caudal de diseño del reactor biológico expresado en m<sup>3</sup>/s para cada línea de tratamiento. Como condición de salida se especifica una condición de presión hidrostática, considerando que la superficie libre se encuentra a 4.98 m sobre la solera (Ros-Bernal, 2020).

Se ha analizado el comportamiento del fluido en régimen laminar y en régimen turbulento, para lo que se han implementado los modelos de turbulencia  $k-\epsilon$  y RNG  $k-\epsilon$ . Por consiguiente, los escenarios analizados han sido:

- 1) Régimen laminar para los tamaños de malla de 0.6, 0.5, 0.4 m.
- 2) Modelo de turbulencia  $k-\epsilon$  para los tamaños de malla de 0.6, 0.5, 0.4 m.
- 3) Modelo de turbulencia RNG  $k-\epsilon$  para los tamaños de malla de 0.6, 0.5, 0.4 m.

Todas las simulaciones incorporan el método de volumen de fluido (VOF) propuesto por Hirt and Nichols (1981) para modelar la superficie libre. Para interpretar los resultados se distinguen los dos orificios de salida (A y B), indicados en la Fig. 1.

## 3. Resultados y discusión

Considerando la Fig. 3, la reducción del tamaño de malla tiende a disminuir el tiempo de retención en la salida A y a aumentar el TRH en la salida B, efecto observado con los tres modelos analizados. Comparando los modelos de turbulencia, el RNG  $k-\epsilon$

tiende a obtener los mayores tiempos de retención en la salida B, mientras que los casos de flujo laminar obtienen el mayor TRH para las mallas más finas en la salida A.

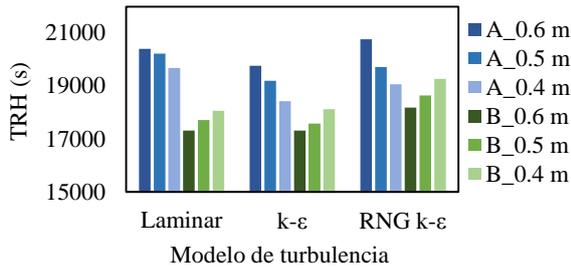


Figura 3. Tiempo de retención hidráulico en los orificios de salida en función del tamaño de la malla y del modelo de turbulencia.

En la Fig. 4 se presenta el error relativo del tiempo de retención hidráulico obtenido con los tamaños de malla más gruesos respecto al calculado con la malla más fina, considerando los resultados proporcionados por esta última los más próximos a la realidad. Esto permite comprobar si se está alcanzando la convergencia de los resultados proporcionados por los distintos modelos y tamaños de malla empleados en el estudio. Las diferencias obtenidas entre los tamaños de malla de 0.5 m y 0.4 m son inferiores a  $\pm 4\%$  en cualquier caso, por lo que el error derivado de emplear un tamaño de malla de 0.5 m frente al tamaño de 0.4 m es reducido.

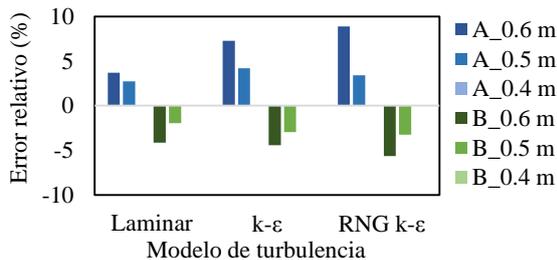


Figura 4. Error relativo del tiempo de retención hidráulico respecto al tamaño de malla más fino.

En el plano horizontal de los orificios de salida se observan distribuciones del tiempo de retención similares para el modelo  $k-\epsilon$  y el modelo RNG  $k-\epsilon$ , con una gran zona muerta en las proximidades de la salida B caracterizada por un aumento del TRH (Fig. 5), lo que puede justificar que existan tiempos de retención similares en ambas salidas, aunque la salida B esté ubicada frente a la entrada.

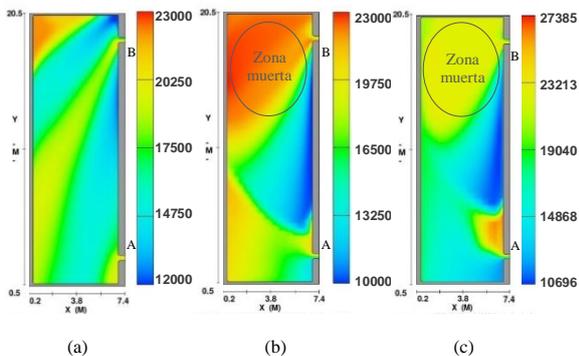


Figura 5. Tiempo de retención hidráulico expresado en segundos (s) para un plano horizontal a nivel de los orificios de salida con un tamaño de malla de 0.4 m: (a) modelo laminar, (b) modelo  $k-\epsilon$ , (c) modelo RNG  $k-\epsilon$ .

La velocidad en la salida B es ligeramente superior a la desarrollada en la salida A (Fig. 6). Esto puede estar motivado por la facilidad de convergencia de las líneas de corriente en el orificio de salida B dada su ubicación respecto a la entrada. El error relativo de la velocidad puede considerarse despreciable al situarse por debajo del  $\pm 1\%$  en todos los casos (Fig. 7).

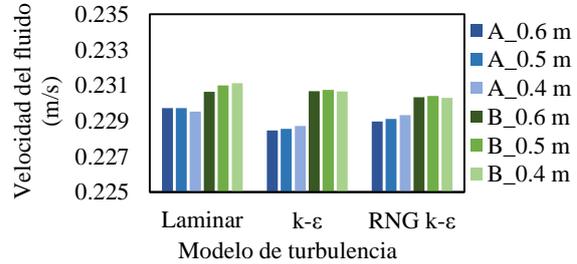


Figura 6. Velocidad del fluido en los orificios de salida en función del tamaño de la malla y del modelo de turbulencia.

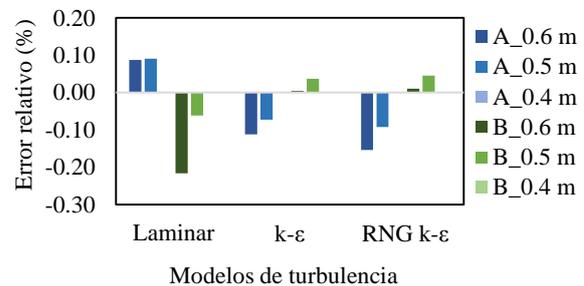


Figura 7. Error relativo de la velocidad respecto al tamaño de malla más fino.

En el plano horizontal de los orificios de salida, en régimen laminar la velocidad se distribuye de manera prácticamente uniforme en el interior de la cámara y es de mayor magnitud que la obtenida con el resto de modelos (Fig. 8). La distribución de la velocidad es similar para los modelos de turbulencia  $k-\epsilon$  y RNG  $k-\epsilon$ , donde las mayores velocidades se registran en una zona de gran tamaño en las proximidades de la salida B y en una zona reducida en las inmediaciones de la salida A. Fuera de estas dos localizaciones puntuales, la velocidad es prácticamente cero en el resto de la cámara a este nivel.

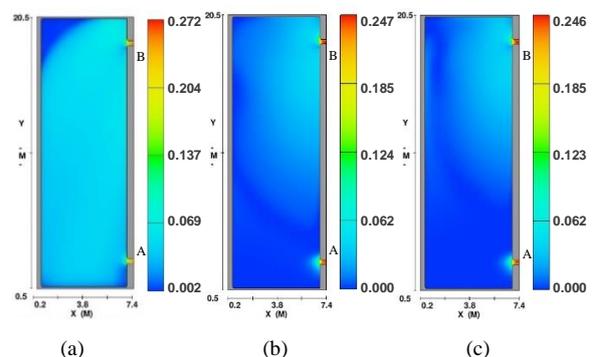


Figura 8. Velocidad expresada en metros por segundo (m/s) en un plano horizontal a nivel de los orificios de salida con un tamaño de malla de 0.4 m: (a) modelo laminar, (b) modelo  $k-\epsilon$ , (c) modelo RNG  $k-\epsilon$ .

En relación a la distancia recorrida por el fluido desde que ingresa a la cámara hasta su salida, el fluido recorre mayor distancia cuando alcanza una zona muerta, dada la recirculación experimentada por

el flujo. La Fig. 9 muestra las diferencias observadas entre los tres modelos en el plano horizontal situado a la altura de los orificios de salida de la cámara.

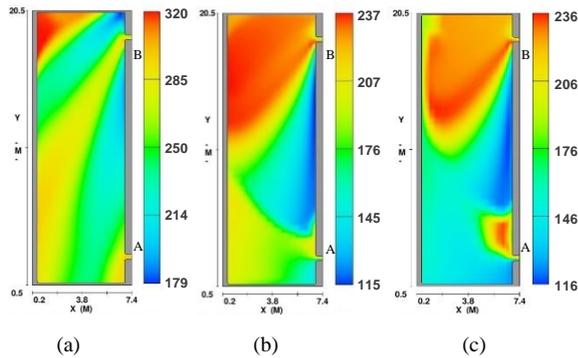


Figura 9. Distancia recorrida por el fluido expresada en metros (m) en un plano horizontal a nivel de los orificios de salida con un tamaño de malla de 0.4 m: (a) modelo laminar, (b) modelo  $k-\epsilon$ , (c) modelo RNG  $k-\epsilon$ .

El modelo laminar tiende a obtener las mayores distancias recorridas por el fluido antes de su salida por ambos orificios (Fig. 10). El refinamiento de la malla supone una ligera disminución de la distancia recorrida por el fluido en la salida A y un aumento de la misma en el orificio B.

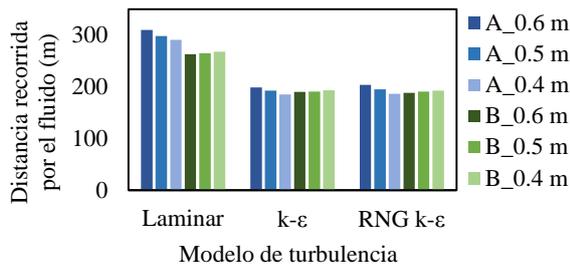


Figura 10. Distancia recorrida por el fluido registrada en los orificios de salida en función del tamaño de la malla y del modelo de turbulencia.

Al trabajar con tamaños de malla más gruesos, el error asociado suele ser de mayor magnitud cuando no se proporciona una resolución adecuada de las características del flujo. En este caso, al aumentar el tamaño de malla se sobreestima la distancia recorrida por el fluido en la salida A, subestimándose en la salida B (Fig. 11).

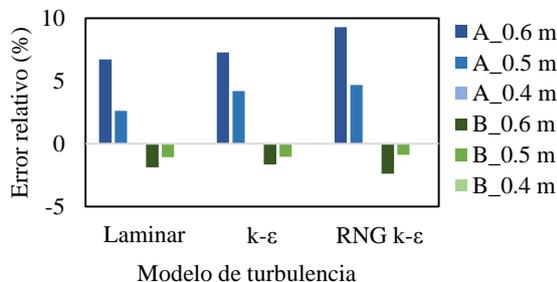


Figura 11. Error relativo de la distancia recorrida por el fluido respecto al tamaño de malla más fino.

Las diferencias de distancia recorrida entre los tamaños de mallado de 0.5 y 0.4 m son inferiores al 5% en todos los modelos de turbulencia en la salida A, e inferiores al 1.1% en la salida B.

## 4. Conclusiones

El modelo laminar tiende a proporcionar menor tiempo de retención hidráulico en relación al resto de modelos, considerando mayor velocidad del fluido en el interior de la cámara y una mayor distancia recorrida por el fluido. Esto último puede estar motivado por la dificultad de este modelo a reproducir curvaturas en las líneas de corriente. El comportamiento observado por los modelos  $k-\epsilon$  y RNG  $k-\epsilon$  es similar.

Generalmente el tamaño de malla de 0.6 m resulta menos preciso. Teniendo en cuenta los reducidos errores relativos del tamaño de malla de 0.5 m respecto al tamaño de 0.4 m, y el coste computacional derivado del refinamiento de la malla, se recomienda el uso de la malla de 0.5 m para abordar este estudio, logrando un equilibrio entre el tiempo de cálculo y la calidad de los resultados obtenidos.

En la siguiente fase de este estudio se plantea la obtención de mediciones de velocidades y TRH en el reactor biológico para conocer la validez de los resultados numéricos presentados, así como poder escoger la configuración que se ajusta más a la realidad.

En este sentido, para realizar un adecuado análisis de mejora resulta esencial realizar campañas experimentales en las estaciones depuradoras de aguas residuales (EDARs) que permitan analizar la bondad de los resultados de los modelos numéricos.

## Referencias

- Flow Science, Inc. (2016). FLOW-3D User Manual v11.2.0.
- Hirt, C., & Nichols, B. (1981). Volume of fluid (VOF) method for the dynamics of free boundaries. *Journal of Computational Physics*, 39, 201-225.
- Karpinska, A., & Bridgeman, J. (2016). CFD-aided modelling of activated sludge systems – A critical review. *Water Research*, 88, 861-879.
- Ros-Bernal, A. (2020). Estudio con herramientas de Dinámica de Fluidos Computacional del reactor biológico de la Estación Depuradora de Aguas Residuales de Roldán, Lo Ferro y Balsicas (Murcia). *Trabajo Final de Grado*. Universidad Politécnica de Cartagena.
- Ros-Bernal, A., Carrillo, J.M., & García, J.T. (2020). Computational fluid dynamics (CFD) study of the biological reactor of the wastewater treatment plant of Roldán, Lo Ferro and Balsicas (Spain). *Procs. of the 1st IAHR Young Professionals Congress*.
- Vesvikar, M., & Al-Dahhan, M. (2005). Flow pattern visualization in a mimic anaerobic digester using CFD. *Biotechnology and Bioengineering*, 89, 719-732.
- Wu, B., & Chen, S. (2008). CFD simulation of non-Newtonian fluid flow in anaerobic digesters. *Biotechnology and Bioengineering*, 99, 700-711.