

UTILIZACIÓN DE LAS TÉCNICAS DE LA FLUIDODINÁMICA COMPUTACIONAL EN EL ANALISIS DE FLUJOS DENTRO DE UN DIGESTOR ANAEROBIO

Alexandra Martínez Mendoza¹, Francisco Zorrilla Soriano², Vicente Fajardo Montañana², P. Amparo López Jiménez¹

¹Departamento de Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente. Universitat Politècnica de València. Camino de Vera S/N 46022, Spain.

²Grupo Aguas de Valencia. Avenida Marqués del Turia 19. 46005 Valencia.

almarmen@posgrado.upv.es

1 Introducción

La digestión anaerobia, es un proceso de estabilización de lodos procedentes de los tratamientos de aguas, con objeto de obtener un lodo inerte y estable, por medio de la degradación de la materia orgánica con microorganismos que se desarrollen en condiciones anaerobias. Para los procesos de digestión anaerobia es de suma importancia la formación de una mezcla homogénea a lo largo de toda la geometría del digestor, con esto se logra una mayor interacción entre organismos y materia orgánica y por ende se consigue una mayor eficiencia del proceso; ya que se evita la sedimentación de partículas sólidas en el fondo y la flotación de biomasa en superficie, y se mantiene el pH y temperatura necesarias para el desarrollo de los microorganismos [1]. Los procesos de mezcla no son fácilmente visibles ni cuantificables, por las condiciones en las que se encuentran estos dispositivos, por lo que las técnicas dirigidas al análisis de los flujos son de gran interés. En la presente comunicación se recurre a las técnicas de simulación para estudiar el comportamiento de la hidrodinámica de los fluidos dentro de los digestores anaerobios, y de esta manera predecir el comportamiento del fango, optimizar procesos y costos; y establecer soluciones a los problemas de diseño que ocurren comúnmente. La necesidad de mezclar eficientemente ha sido ya mencionado en la literatura técnica [2].

En la actualidad, los modelos pueden llegar a convertirse en una herramienta muy potente para la representación de estos comportamientos digestores. Recientemente, pueden encontrarse referencias en la literatura relacionados con la digestión de optimización de procedimientos mediante el análisis de la mezcla adecuada en el entorno de las bacterias anaerobias. [3]. Incluso se documentan algunos estudios de modelos realizados mediante el uso de modelos dinámicos para investigar el rendimiento de la digestión anaerobia [2]. En estos estudios, la importancia de los indicadores de mezcla, como el tiempo de retención y el grado de mezcla se ponen de manifiesto.

Un modelo de flujo de 3-D fue desarrollado por Fleming [4], teniendo en cuenta una amplia gama de aspectos tales como el movimiento del fluido a granel, la sedimentación, la burbuja de la mezcla, el arrastre de burbujas, y boyante mezcla para simular los patrones de flujo de un digestor de laguna cubierta.

La importancia de la definición de indicadores de funcionamiento ha sido documentada por Keshtkar et al. en [5]. Se proponen dos parámetros característicos de mezcla: el volumen relativo de la región de flujo continuo, y la relación entre el tipo de cambio de flujo interno para el caudal de alimentación para evaluar el rendimiento de la digestión. En este sentido, Peña et al. [6] estudiaron modificados a escala piloto lagunas anaerobias que reciben las aguas residuales domésticas con diferentes configuraciones y velocidades de flujo.

En primer lugar en 3-D en estado estable dinámica de fluidos computacional (CFD) encontramos en la bibliografía referencias de simulaciones en Vesvikar y Al-Dahhan [7] para visualizar los patrones de flujo y para obtener parámetros de hidrodinámica. Además, en Vesvikar y Al Dahhan y Vesvikar et al. [8] un análisis automatizado de rastreo de partículas radiactivas y la tomografía computarizada se utiliza para visualizar los patrones de flujo y obtener los parámetros de hidrodinámica en imitar a los digestores anaeróbicos. En Karim et al. [9], [10], [11] y [12] se propone un estudio experimental del efecto de la mezcla (de recirculación de biogás,

el impulsor, y la recirculación de lodos) en la digestión anaerobia de residuos animales para digestores a escala de laboratorio. Binxin Wu [13] implementado un modelo de CFD para predecir el campo de flujo en una mezcla de un digestor anaerobio, teniendo en cuenta fluido newtoniano no, obteniendo resultados completamente diferentes.

En esta línea de trabajo, la presente comunicación se centra en el modelado de la dinámica de fluidos dentro del digestor y la definición de parámetros para identificar la mezcla en su interior. El objetivo principal de este trabajo es el modelado de la hidrodinámica del digestor con el fin de estudiar e identificar las zonas de mezcla y de las zonas de mezcla o ni poca mezcla que llamamos las zonas muertas. CFD representa la posibilidad de visualizar el flujo en el interior del digestor, y analizar en detalle la mezcla y los parámetros que representan a esta dinámica.

2 Desarrollo del modelo

2.1 Geometría y mallado del modelo

El modelo desarrollado se hizo bajo las mismas dimensiones de un digestor perteneciente a la planta de tratamiento de aguas residuales de Quart-Benager; 30,50 m de diámetro y 8,8 m de altura útil, para un volumen total de 6504 m³. El digestor está construido con paredes en hormigón armado de 0,5m de espesor. El digestor está cubierto por una cúpula esférica de 12 cm de espesor. La extracción de los fangos se realiza por medio de una tubería central y a través de una toma a media altura. La alimentación de fango hacia el digestor se hace a través de unas toberas, que forman parte del sistema de agitación; que consiste en la introducción de fango por medio de un chorro a gran velocidad que genera un arrastre de la misma periferia de la superficie que limita el chorro. Este arrastre es esencialmente debido a las fuerzas resultantes de la viscosidad del líquido y de la velocidad del chorro. Las fuerzas que entran en juego crean una zona de inestabilidad de velocidades que se traduce en una zona de turbulencia.

Con las dimensiones reales del digestor se ha realizado una réplica de la geometría en el programa AutoCAD 3D, como se indica en las figura 1 y 2.

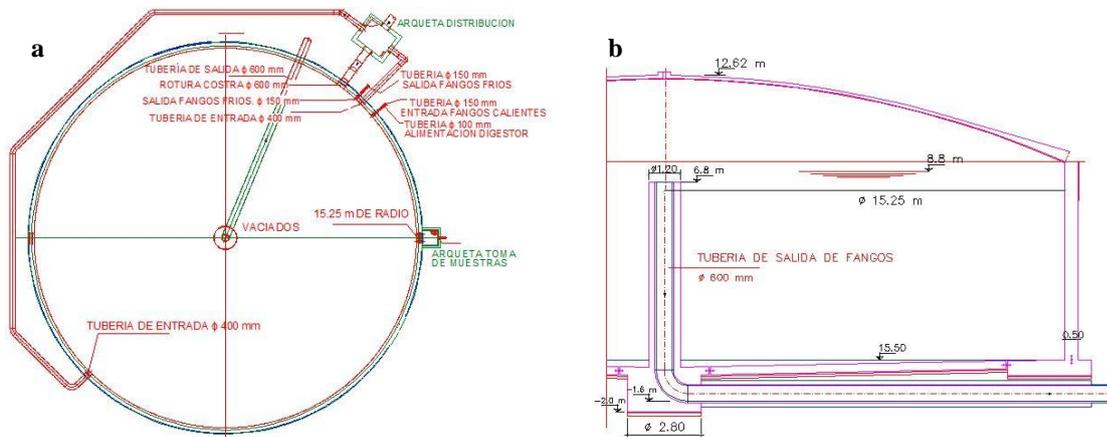


Figura 1. Detalles de la Geometría del digestor. (a) Vista superior. (b) Vista lateral.

Para la creación de la geometría del modelo se hicieron varias modificaciones como:

- La entrada del afluente, se realiza por las dos toberas del sistema de agitación, con una misma velocidad de entrada, y por otras dos tuberías una para alimentar el digestor y otra para entrada de fangos calientes.
- La salida del fango se realiza por vaciado desde una tubería central y por otra salida lateral llamada salida de fangos fríos. Se omite la salida de los fangos por rebose.
- En este modelo, no se tiene en cuenta la temperatura, solo los flujos, a los que se les dan condiciones fijas a las entradas. Por lo tanto la viscosidad y la densidad son constantes.

- Se realiza en una sola fase, o sea que se omite la fase gaseosa.
- Se mantiene la geometría del digestor, solo se modificaron las direcciones de ángulos de las toberas, para estudiar mejor el comportamiento del flujo.

Una vez se crea la geometría se construye el modelo matemático, llamado mallado o discretización del continuo generando un sistema de ecuaciones; previamente definidas con elementos poliédricos y prismas para el volumen. El mallado superficial generó 177.412 caras. Y el mallado de volumen generó 848.729 celdas, 5'546.667 caras interiores y 4'644.641 vértices. El mallado que se obtuvo es muy preciso, solo se tuvo en cuenta el tamaño más pequeño de los elementos presentes para ajustar los valores bases dados por el programa por defecto. El tamaño de celda está condicionado a 0.22m y este se determino por tanteo hasta llegar a él, de forma que las condiciones de la malla fueran las adecuadas para la modelación.

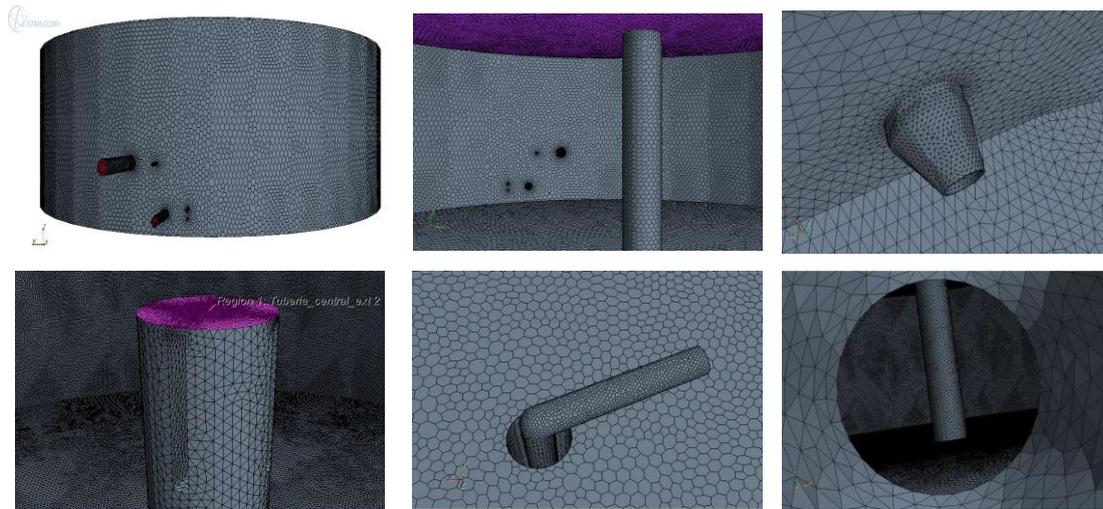


Figura 2. Detalles del mallado

2.2 Detalles de la simulación

La simulación del problema de la fluidodinámica computacional acaecida en el interior del digestor se realiza mediante un software comercial STARCCM+, de contrastada aplicación y validez en modelaciones como la que aquí se considera. Este modelo comercial discretiza las ecuaciones fundamentales del movimiento de los fluidos mediante la técnica de los volúmenes finitos y con las condiciones de contorno adecuadas y una malla de nudos definida para todo el espacio a modelar, se calculan las velocidades y presiones en todos los puntos del interior del digestor.

Para llevar a cabo la simulación se determinaron las condiciones de velocidad de entrada del fango y de presión para las salidas del fango.

Además se especificaron las condiciones en las cuales se quería realizar la simulación:

- Modelo en 3 dimensiones, estado estacionario
- Las características del fango de la Planta de tratamiento de QUART-BENÁGER como lo son: Densidad (996.36 Kg/m³) y viscosidad dinámica (0.065 Pa-s).
- Flujo Turbulento. Usando el modelo estándar k-ε [15] . El modelo estándar k-ε es un modelo semi-empírico basado en ecuaciones de transporte para la energía cinética turbulenta (k) y su rango de disipación (ε). En este modelo, se asume que el flujo es totalmente turbulento, y los efectos de la viscosidad molecular son insignificantes. Este modelo se considera el más conveniente para la aplicación que se está considerando en la presente modelación.

Posteriormente de la resolución del sistema de ecuaciones generado mediante el mallado y de haberse definido las condiciones del modelo, se ejecutó el programa con varias iteraciones tras conseguir unos resultados

favorables. El número de iteraciones que se realizó fue el que proporcionó unos resultados para la convergencia aceptables en los criterios que comúnmente se utilizan para este tipo de modelaciones.

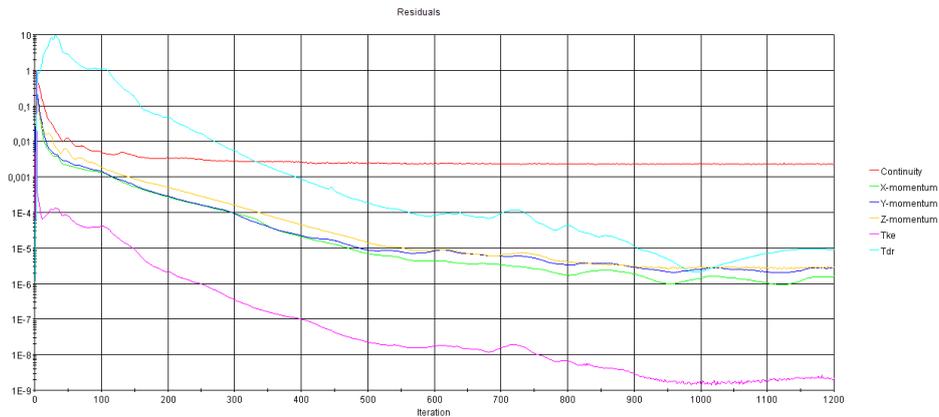


Figura 3. Valores de los residuos en el modelo.

3 Resultados

El análisis de resultados se ha enfocado en los campos de velocidad, en la identificación de zonas de mezcla y zonas muertas e ISO-superficies que representan zonas escalares con valores constantes, en este caso volúmenes con velocidades constantes.

Para una mejor comprensión de las medidas que se toman para el análisis se grafica a continuación los cortes para medición con las respectivas alturas (0,0 0,7 4,0 y 7,8 m de altura) y la ilustración del eje de coordenadas. Además se enumeran las simulaciones y se resumen en la tabla 1.

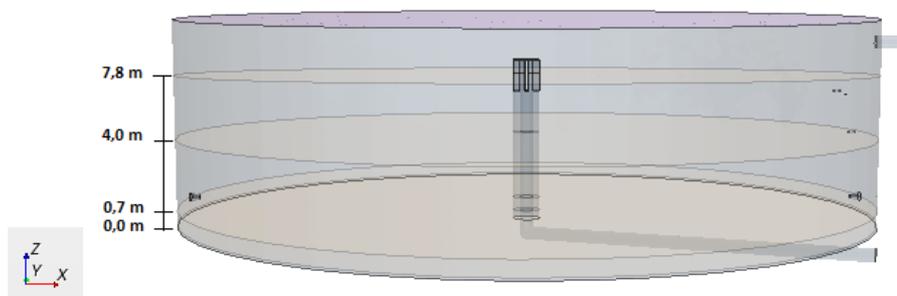


Figura 4. Cortes verticales, realizados para el análisis de los resultados

3.1 Visualización de campos de velocidad

La velocidad, es el parámetro que permite la visualización de la dirección y la magnitud a la que el fango se encuentra en movimiento, y por ende establece la existencia de mezcla o no dentro del digester. Por esta razón se estudia el comportamiento del fango a través de los análisis de la velocidad.

A través de los resultados de la simulación se observaron los campos de velocidad dentro del digester y se han identificado dos zonas que presentan mayor valores de velocidades, la zona de entrada del fango por las toberas y la zona de salida del fango en la tubería central.

En las gráficas es muy notorio cuando, al introducirse el fango por las toberas ingresan con mayor velocidad por la forma reducida de la boquilla, entran en contacto con el fango presente formándose una zona de inestabilidad o turbulencia. La velocidad del fango empieza a disminuir a medida que se alejan de la tobera, hasta hacerse pequeña y antes de que sea una velocidad muy reducida se encontrara con el chorro de inyección de la otra

tobera. De esta manera el fango sigue un movimiento de arrastre debido a la limitación de las paredes y al impulso constante del chorro. La magnitud máxima de la velocidad justo a la salida de la tobera es de 1,65 m/s.

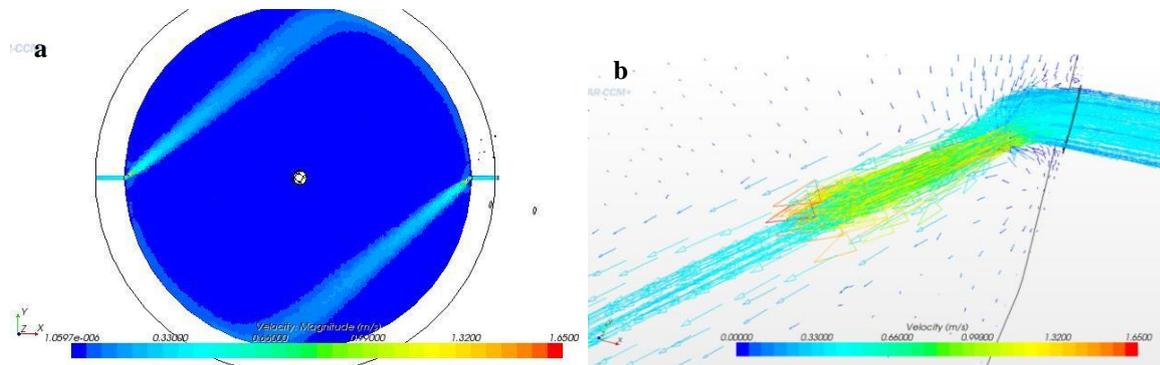


Figura 5. Visualización de la velocidad. (a) Corte a la altura de la entrada. (b) Dirección y magnitud de la velocidad a la entrada de la tobera.

Otra de las áreas donde se observa una mayor velocidad del fango es en la zona donde sale el mismo por la tubería central, ya que se crea una zona de turbulencia al verse reducida la salida del fango. Las velocidades máximas son de 0,84 m/s. Tal y como se muestra en la figura 6.

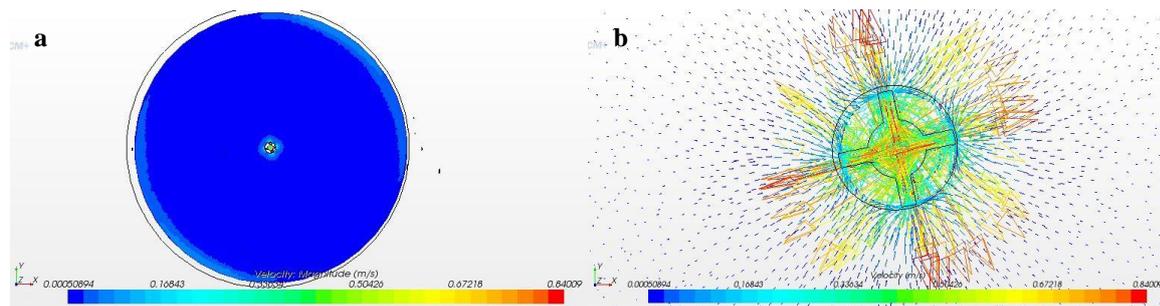


Figura 6. Visualización de la velocidad. (a) Corte a la altura de la tubería de salida. (b) Dirección y magnitud de la velocidad a la salida de la tubería central.

Otra visualización para corroborar las zonas que presentan un flujo continuo, es a través de las ISO superficies. Tal como se muestra en la figura 7(a), donde los valores que están por debajo de 0,001 m/s, son zonas aisladas que no llevan una trayectoria, como se muestra en la figura 7(b) en el cual los flujos con velocidades mayores a 0,001 m/s inician el recorrido en las toberas y siguen la trayectoria por las paredes del digestor.

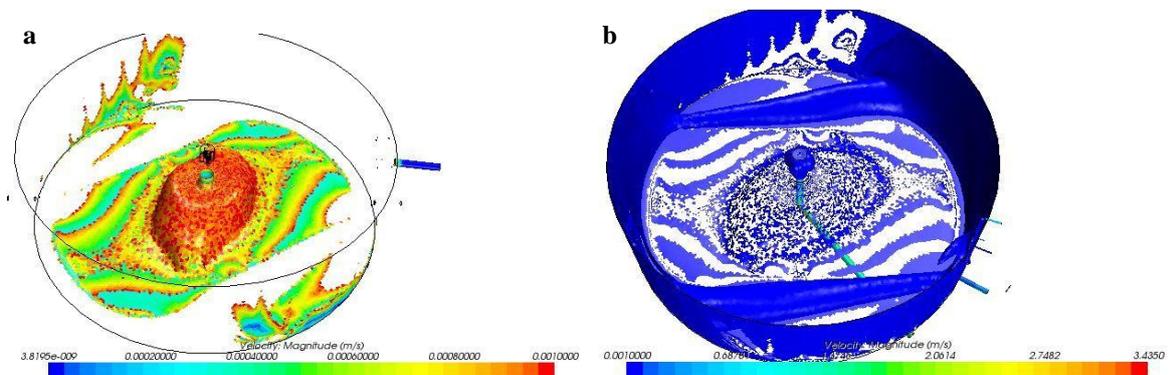


Figura 7. Iso-superficies. (a) Flujos con velocidades menores a 0,001m/s. (b) Flujos con velocidades mayores a 0,001 m/s.

3.2 Cambios en la dirección del flujo

La dirección del flujo de las toberas es uno de los parámetros más importantes para la obtención de una buena mezcla. La dirección de las toberas está definida como α si se observa desde la vista superior del digestor y como β si se observa desde la vista lateral del digestor.

Tabla 1 Ángulos de dirección de las toberas

Simulaciones	Angulo α	Angulo β
Simulación 1	30°	30°
Simulación 2	0°	0°
Simulación 3	30°	22°
Simulación 4	15°	0°

Los ángulos de la dirección para ambas perspectivas se muestran a continuación para una mejor comprensión de los cambios realizados.

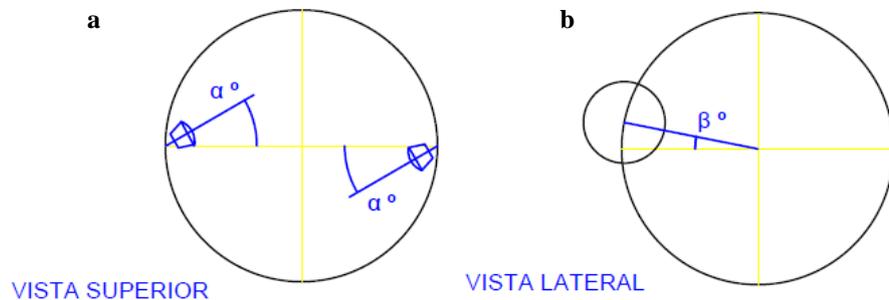
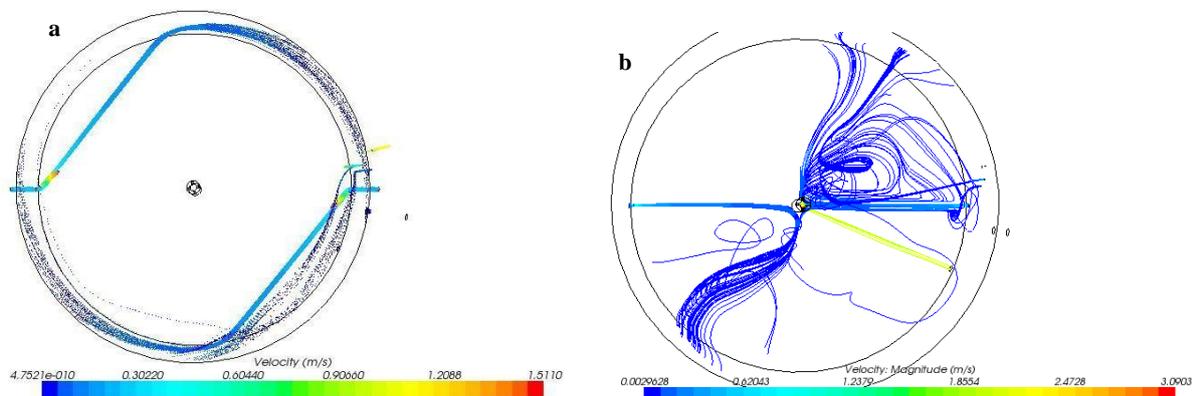


Figura 8. Dirección de las toberas. (a) Vista superior $x=1, y=0, z=0$. (b) Vista lateral $x=0, y=0, z=1$.

Todas las simulaciones han mostrado una buena mezcla dentro del digestor. Para las simulaciones 1, 3 y 4 el flujo sigue el curso de la forma del digestor, un flujo de trayectoria circular continua. La simulación 2, el flujo tiene un comportamiento diferente, ya que ocurre un choque frontal de ambas direcciones de flujo en la mitad del tanque y de allí se devuelve.

Se construyen unas graficas con las líneas de corrientes para mostrar gráficamente la dirección del flujo en el digestor en las 4 simulaciones realizadas.



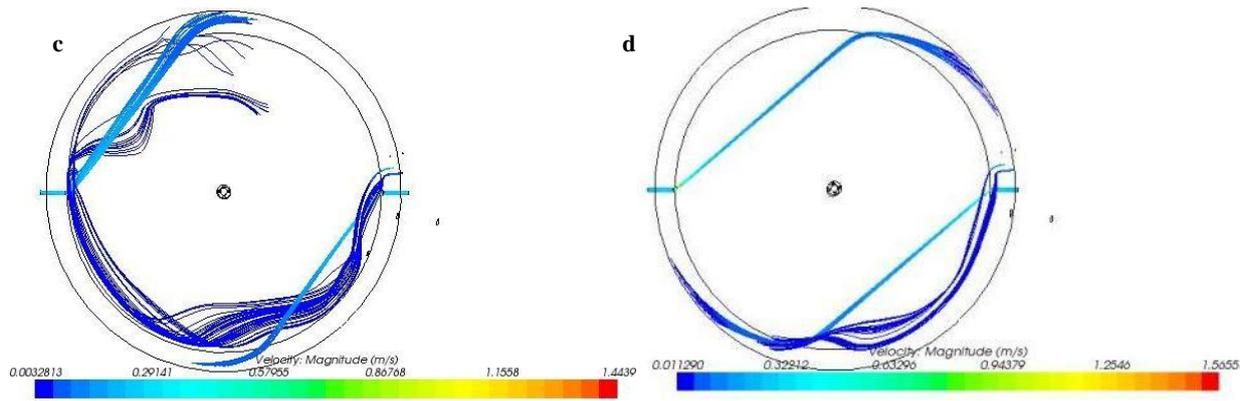
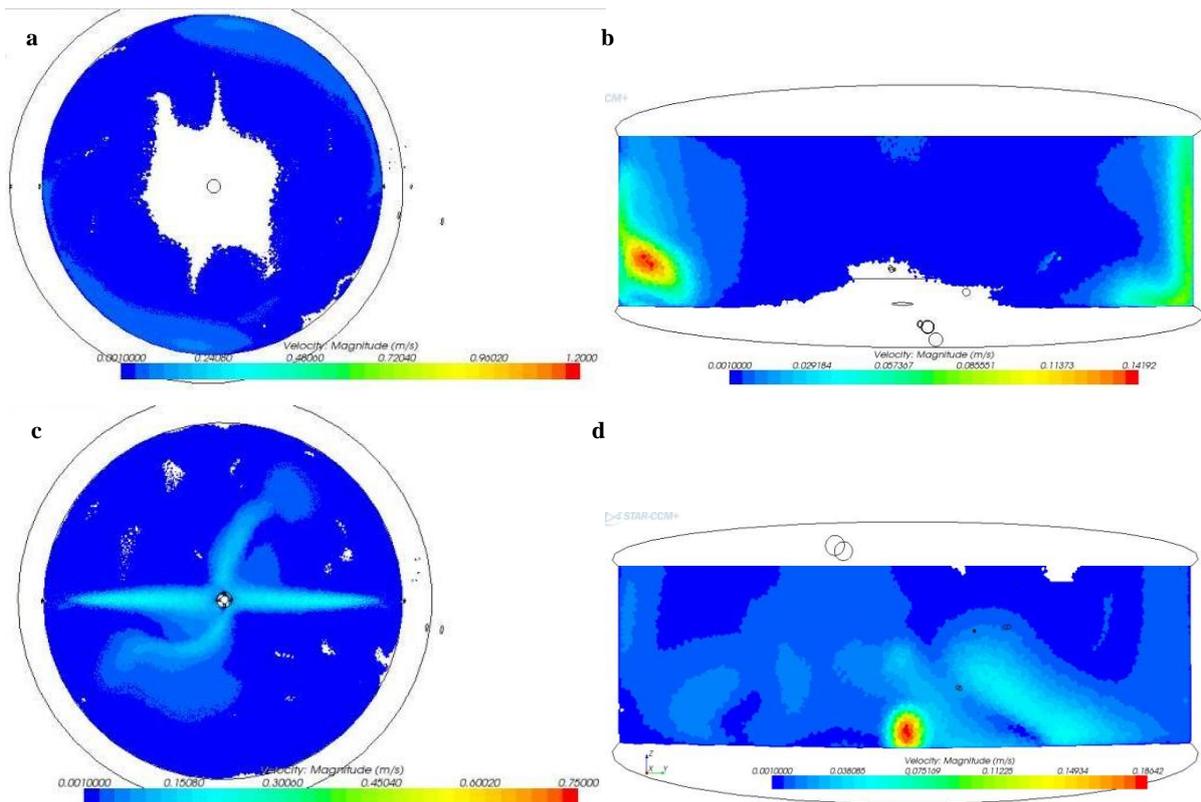


Figura 9. Líneas de corriente dentro del digestor. (a) Simulación N°1. (b) Simulación N°2. (c) Simulación N°3. (d) Simulación N°4.

3.3 Definición de zonas de mezcla y no mezcla

Se consideran zonas muertas o zonas de no mezcla, si la velocidad del fango es menor que la velocidad de sedimentación de Stokes 0,001 m/s, para partículas de biomasa de 245 μm de diámetro y 1050 Kg/m^3 de densidad de masa, [9] y [16, 17]. Por lo que quedan definidas zonas de mezcla cuando velocidad es mayor a 0,001 m/s y para zonas muertas cuando la velocidad es igual o inferior a 0,001 m/s.



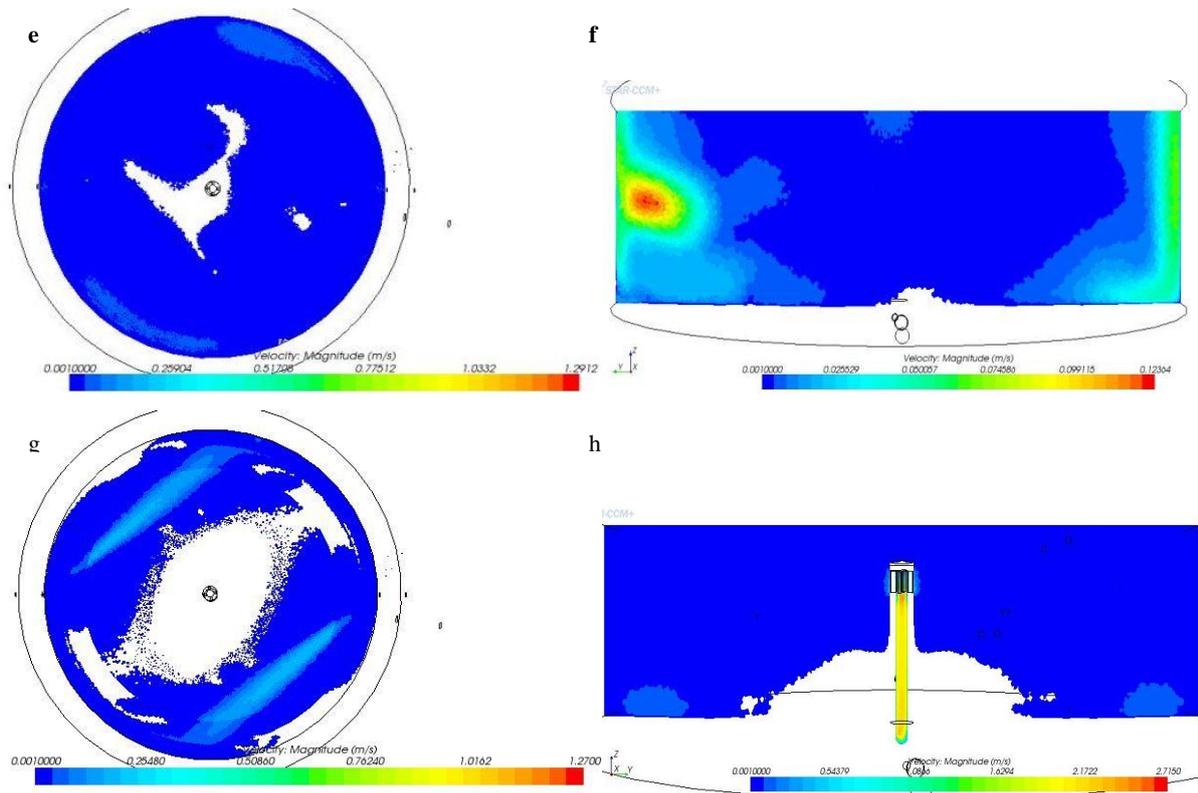


Figura 10. Simulación N°1, a 0m vista superior (a) y vista lateral (b). Simulación N°2, a 0m vista superior (c) y vista lateral (d). Simulación N°3, a 0m vista superior (e) y vista lateral (f). Simulación N°4, a 0m vista superior (g) y vista lateral (h).

En la simulación N°1, las zonas de mezcla son del 85% a los 0 m y 0,7 m de altura, y del 94% a los 4 m y 7,8 m. En la figura 10 (a y b) se muestran que la zona de mezcla está cerca de las paredes del digestor; y las zonas muertas se forman en el medio del fondo del digestor.

Para la simulación N°2, los valores obtenidos en esta simulación son 96% en las aéreas del fondo y 98% a la altura de la tobera, Figura 10 (a), que representan las aéreas con velocidades mayores a 0,001 m/s, solo un 4 y 2 por ciento respectivamente indica valores con velocidades inferiores a 0,001 m/s. lo que muestra una mezcla apropiada en estas zonas. Figura 10 (d) En cuanto a los demás cortes realizados horizontalmente en la parte superior son del 95% y 97% en el corte vertical a lo largo del digestor, así que se mantienen altos porcentajes de mezcla, con pequeñas zonas muertas.

Durante la simulación N°3, se obtuvieron valores de mezcla del 94% a la altura de la tobera y el fondo, en las zonas centrales e inferiores se forma una zona que no interactúa con el resto del flujo, figura 10 (e); debido a la dirección de la tobera, que está inclinada 22° con respecto al eje horizontal. Figura 10 (f) la mezcla en las zonas de la parte superior del digestor es del 95%, se observa una zona constantemente activa.

Para la simulación N°4, se obtuvieron valores de mezcla a la altura de la tobera del 83% y 66 % por ciento en el fondo. Dejando un 34 por ciento de zonas muertas en el fondo. Este valor ha sido el valor más grande de zonas muertas que se ha encontrado en todas las simulaciones realizadas. Figura 10 (g). Esta simulación a pesar de mostrar una inadecuada mezcla en el fondo, se contrarresta con una mezcla muy apropiada en la parte superior y media del tanque con valores del 100 por ciento de mezcla, lo que quiere decir que en esas zonas las velocidades están todas por encima de 0,001 m/s figura 10 (h). En este caso el flujo inyectado asciende y no interactúa con el fango que está por debajo de las toberas, formando las zonas muertas evidentes en los gráficos. Al ascender va haciendo un barrido por las paredes e inicia su mezcla desde las paredes, hasta alcanzar una mezcla total en las partes más altas del digestor.

3.4 Evaluación del criterio de mezcla

Con los resultados obtenidos en las simulaciones, se determinaron varios criterios para definir cuál de todas las simulaciones arroja mejores resultados. Toda la evaluación se rige por la definición de zonas de mezcla (velocidades por encima de 0,001m/s) y zonas muertas (velocidades iguales y menores a 0,001m/s). Luego se sacaron porcentajes de mezcla en cada una de las secciones estudiadas (0, 0,7, 4 y 7,8 metros), dentro del digestor. Se analizan los porcentajes de zonas de mezcla, considerando que si todos los valores en los diferentes cortes realizados en el digestor están por encima del 85 por ciento presentan una buena mezcla o por debajo de este porcentaje una mezcla inapropiada. Ya una vez se analizan los porcentajes para las zonas de mezcla lo que interesa es la zona muerta en cuestión donde está ubicada, y que tanto es sensible a el cambio de la dirección del flujo. Según los resultados la simulación numero 2 y 3 muestran mejores zonas de mezcla dentro del digestor, y solo tiene el déficit de generar zonas muertas en las paredes del digestor a lo largo del tanque y en la parte superior. Ver la figura 11.

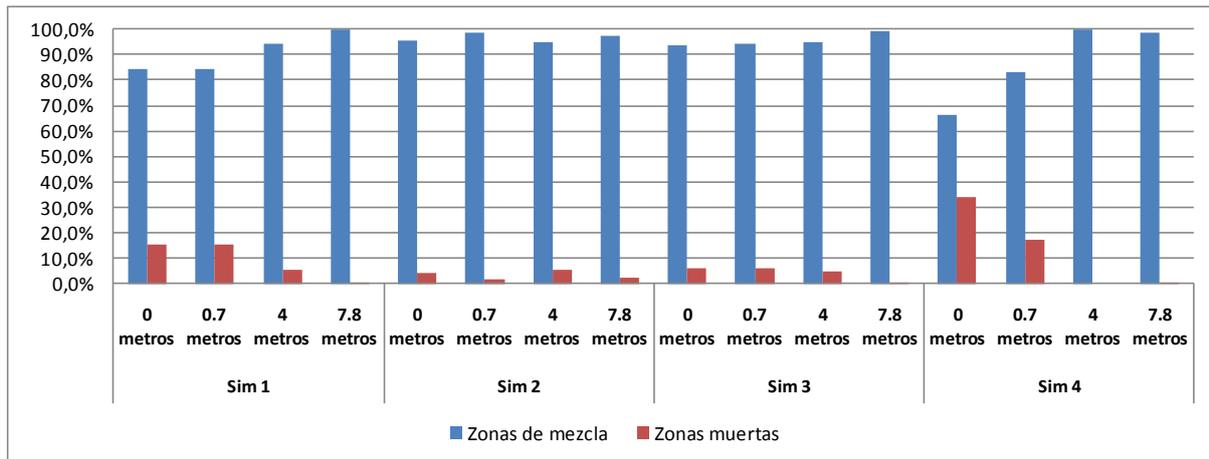


Figura 11. Porcentaje de mezcla

4 Conclusiones

Para los procesos de digestión anaerobia es necesario que el fango este constantemente mezclado, para evitar estratificación y obtener el rendimiento optimo del proceso. Por esto es tan importante analizar el comportamiento de la hidrodinámica del fluido (fango) en el interior del digestor, e identificar las zonas de estancamiento o zonas muertas que se presenten.

La construcción de un CFD en un sistema de digestión anaerobia proporciona la visualización y estudio del movimiento del fango dentro del digestor, y ayuda a la determinación de toma de decisiones para el diseño.

A través de las diferentes simulaciones realizadas se ha estudiado la variabilidad de los datos, los cambios de flujo, la distribución de las velocidades y las líneas de corriente dentro de la geometría, jugando un papel determinante la forma del flujo de entrada por las toberas; ya que se pueden disminuir la aparición de zonas muertas, con un cambio de la dirección de los ángulos con respecto a la vertical y horizontal del diámetro del digestor. Al ser la tobera una estructura adicional y que puede ser retirada, se consiguen simulaciones con resultados variables, para así encontrar la dirección del flujo más acertada, que a su vez, puede llegar a implementarse en la realidad.

Uno de los objetivos es conseguir la óptima velocidad dentro del digestor, además de que se ha iniciado con la velocidad de sedimentación de los sólidos de 0,001m/s. Esta suposición permite determinar si las partículas sólidas se empiezan a sedimentar y para que esto no ocurra, la velocidad de las partículas debe ser mayor. En este modelo la mayoría de las celdas simuladas presentan velocidades por encima de esta velocidad, solo unas pocas de ellas están por debajo de dicha velocidad. Muchas de las graficas rectifican estos resultados; áreas con menos mezcla. Sin embargo, sí que se observa que todas las geometrías no son igualmente eficientes, ni las zonas muertas aparecen exactamente en los mismos sitios, dependiendo de la dirección con la que entre el flujo incidente.

Finalmente los resultados han sido satisfactorios y el modelo puede ser llevado a una segunda fase de modelización de análisis de temperatura. La validación de estas simulaciones estará basada en medidas de temperatura dentro del digestor. Con este paso, una metodología será propuesta basada en las consideraciones del CFD, para así ayudarnos a estandarizar el sistema de operación dentro del digestor.

Más allá de los resultados de esta modelación en particular, la presente comunicación pone de manifiesto que las técnicas de la fluidodinámica computacional se presentan como una herramienta capaz para la modelación de aspectos que de otra manera, para los gestores son completamente opacos, como los perfiles de velocidades en el interior del digestor anaerobio.

Agradecimientos. Los autores agradecen su colaboración a la Entidad Pública de Saneamiento de Aguas Residuales (EPSAR); y al Vicerrectorado de Investigación la Universidad Politécnica de Valencia por su ayuda de Línea Multidisciplinar Aplicación de las técnicas de la Mecánica de Fluidos computacional a Modelación de movimiento de flujos ambientales, con registro 2614.

5 Referencias bibliográficas

- [1] Mehul S. Vesvikar, Muthanna Al-Dahhan. Flow pattern visualization in a mimic anaerobic digester using CFD. *Biotechnology and Bioengineering* 2005, 89(6), 719-732.
- [2] Bello-Mendoza R and Sharratt PN. Modelling the effects of imperfect mixing on the performance of anaerobic reactors for sewage sludge treatment. *J Chem Techno Biotechnology* 1998, 71:121–130.
- [3] Monteith HD, Stephenson JP. Mixing efficiencies in full-scale anaerobic digesters by tracer methods. *J WPCF* 1981.53:78–84.
- [4] Fleming JG. Novel simulation of anaerobic digestion using computational fluid dynamics. PhD Dissertation. North Carolina State University, Raleigh, NC. 2002.
- [5] Keshtkar A, Meyssami B, Abolhamd G, Ghaforian H, Asadi MK. Mathematical modeling of non-ideal mixing continuous flow reactors for anaerobic digestion of cattle manure. *Bioresour Technol* 2003. 87:113–124.
- [6] Pena MR, Mara DD, Piguet JM. Improvement of mixing patterns in pilot-scale anaerobic pond treating domestic sewage. *Water Sci Technol* 2003. 48(2):234–242.
- [7] Vesvikar MS, Al-Dahhan MH. Flow pattern visualization in a mimic anaerobic digester using CFD. *Biotechnol Bioeng* 2005. 89:719–732.
- [8] Vesvikar MS, Varma R, Karim K, Al-Dahhan MH. Flow pattern visualization in a mimic anaerobic digester: Experimental and computational studies. *Water Sci Technol* 2005. 52:537–543.
- [9] Karim K, Varma R, Mehul V. M.H. Al-Dahhan. Flow Pattern visualization of simulated digester. *Water Research* 2004. 38, 3659-3670.
- [10] Karim K, Klasson KT, Hoffmann R, Drescher SR, DePaoli DW, Al-Dahhan MH. Anaerobic digestion of animal waste: Effect of mixing. *Bioresour Technol* 2005. 96:1607–1612.
- [11] Karim K, Hoffmann R, Klasson KT, Al-Dahhan MH. Anaerobic digestion of animal waste: Waste strength versus impact of mixing. *Bioresour Technol* 2005. 96:1771–1781.
- [12] Karim K, Hoffmann R, Klasson KT, Al-Dahhan MH. Anaerobic digestion of animal waste: Effect of mode of mixing. *Water Res* 2005. 39: 3597–3606.
- [13] Binxin Wu, Shulin Chen. CFD Simulation of Non-Newtonian Fluid Flow in Anaerobic Digesters. *Biotechnol Bioeng* 2007. 99:700–711.
- [14] USER GUIDE STAR-CCM+ Version 5.02. © 2009 CD-Adapco.
- [15] Launder, B.E., Spalding, D.B. (1972). *Mathematical Models of Turbulence*. Academic Press. London, UK .
- [16] Peak RS. X-analysis integration (XAI) technology. Georgia Tech Report EL002-2000A, 2000.
- [17] ITT Water & Wastewater. Design recommendation. Digester mixing.
http://www.itttreatment.com/designrecommendations/m_digestion_digestor_mixing.pdf