



Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos,
Canales y Puertos



UNIVERSIDAD DE CANTABRIA

ANÁLISIS DE LA HIDRODINÁMICA EN UN REACTOR BIOLÓGICO INNOVADOR PARA DEPURACIÓN DE AGUAS RESIDUALES MEDIANTE MODELIZACIÓN

Trabajo realizado por:

Ricardo Blanco Aguilera

Dirigido:

Rubén Díez Montero

Juan Ignacio Tejero Monzón

Titulación:

Máster Universitario en Ingeniería de Caminos, Canales y Puertos

Santander, Julio de 2016

TRABAJO FINAL DE MÁSTER



Agradecimientos

Hace ya seis años comencé una aventura, un sueño: Ser Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. Hoy, no puedo evitar echar la vista atrás y sonreír al recordar todos los momentos que he vivido. Todas las caídas, todos los golpes, todas las lágrimas y todas las noches en vela. Pero también, todas las sonrisas, todas las victorias, todas las conquistas y todas las glorias. No quisiera despedirme de esta etapa sin dar las gracias y homenajear a todos aquellos que me han acompañado a trazar este duro camino.

En primer lugar, quiero agradecer a Iñaki Tejero el haberme dado la oportunidad de trabajar en su grupo, de participar en un proyecto real y excitante, de abrirme las puertas a un nuevo mundo, el de la investigación, del cual parece que será difícil sacarme.

También quiero agradecer a Rubén Díez su implicación, su ayuda, su tutela, su dirección. Su infinita disponibilidad y sonrisa cuando no es el momento. Por confiar en mí, por no dudar nunca de mí y por valorar todo mi esfuerzo. Siento que además de un mentor, me llevo un amigo. Gracias.

No quisiera olvidarme de todos los compañeros con los que me he cruzado a lo largo de estos seis años. Sin duda son mi verdadero premio. Todos y cada uno de vosotros habéis hecho que todo fuese más fácil. Ha sido un placer, pero sobretodo un honor compartir sangre, sudor y lágrimas.

Especialmente quiero acordarme de Xabier Blanco y Jagoba Gamero, mis confidentes, mi apoyo, y desde hace tiempo, mis hermanos. Quién nos iba a decir que después de tanto íbamos a estar aquí, a un paso del objetivo. Nunca podré agradeceros todo lo que me habéis enseñado y aguantado. Esto va también por vosotros. También a mi compañero de ansiedad y fatigas Álvaro Martínez: parece que no han podido tumbarnos.

Un recuerdo también para el colegio e instituto públicos de Durango, donde estudié y me formé como persona, y a todos los compañeros que allí dejé. Especialmente para mis amigos Jon y Asier, porque siempre hemos utilizado la música y el rock como vía de escape.

Por último, quisiera agradecer a mi familia el continuo apoyo y cariño que me han mostrado: A mi hermano pequeño, Jose Antonio, por aguantar toda mi ira y mal humor. A mis dos abuelos, me hubiese gustado que estuvieran aquí para poder ver terminar esta etapa de mi vida. A mi abuelas Felisa y María, y a mi tía María, por todo vuestro amor desde que nací. A Sara, por apoyarme en los momentos más difíciles. Pero, sobre todo, quiero agradecer a mis padres, María y Domingo, el empeño y el infinito esfuerzo que han hecho para que yo solamente tuviese que preocuparme por estudiar. Por enseñarme a pelear, a no ser conformista, a ser ambicioso, pero sobre todo por enseñarme que sin esfuerzo y sacrificio, nunca hay recompensa. El tiempo pasa igual para todos y solo en nuestra mano está el saber aprovecharlo. Siempre os estaré agradecido por todo lo que habéis luchado por nosotros, espero que estéis tan orgullosos de mí como yo lo estoy de vosotros. Os quiero.

Ricardo Blanco Aguilera

Santander, 8 de julio de 2016



TÍTULO DEL TRABAJO FINAL DE MÁSTER:

Análisis de la hidrodinámica en un reactor biológico innovador para depuración de aguas residuales mediante modelización.

AUTOR: Ricardo Blanco Aguilera

DIRECTORES: Rubén Díez Montero
Juan Ignacio Tejero Monzón

CONVOCATORIA: Julio de 2016

PALABRAS CLAVE:

Depuración de aguas residuales, eliminación biológica de nutrientes, reactor biológico anóxico-anaerobio, modelización, hidrodinámica, dinámica de fluidos computacional.

RESUMEN:

En el presente trabajo se ha analizado mediante modelización y simulación el comportamiento hidrodinámico de un reactor biológico innovador para eliminación de nutrientes de aguas residuales, denominado AnoxAn. En AnoxAn se integran las zonas anaerobia y anóxica necesarias en el proceso de eliminación biológica de nitrógeno y fósforo. El reactor, de flujo ascendente y lecho de fangos, está dividido verticalmente con la zona anaerobia anaerobia en el fondo y la anóxica encima. Esta zona anóxica recibe una recirculación rica en nitratos de un posterior reactor aerobio, proporcionando las condiciones para la desnitrificación, mientras que la separación hidráulica entre zonas en el interior del reactor ha de garantizar ausencia de nitratos en la zona anaerobia. Para ello se emplean sistemas de agitación específicos complementados con deflectores.

Se ha empleado la Dinámica de Fluidos Computacional para construir y simular un modelo en 2D del reactor. En primer lugar se ha analizado el comportamiento hidráulico sin agitación, para posteriormente incorporar el funcionamiento continuo e intermitente de agitadores. Se ha observado que el funcionamiento intermitente del agitador anóxico es el elemento del sistema que supone un mayor coste y dificultad computacional, y por ello se han comparado diferentes algoritmos de resolución para seleccionar el que mejor se ajuste al caso de estudio. Esto ha permitido optimizar el modelo, reduciendo el tiempo de resolución más de un 50% obteniendo los mismos resultados.

Los principales resultados muestran que cuando ambos agitadores están en funcionamiento se consigue una elevada separación hidráulica entre las zonas anóxica y anaerobia. Esta separación se debe sobre todo a la alta velocidad de succión de los agitadores. La influencia del Tranquilizador BLAS y sobre todo del deflector es pequeña, a diferencia de lo que cabía esperar. En cambio, cuando el agitador anóxico deja de funcionar, la fuerte succión que genera el agitador anaerobio influye sobre todo el compartimento superior, mezclando el contenido de la zona anóxica en la zona anaerobia. Se concluye que la separación hidráulica entre las zonas anóxica y anaerobia se debe en gran medida a la velocidad de succión que generan los agitadores y en menor medida a la influencia del deflector y tranquilizador, produciéndose una mayor eficacia en dicha separación cuando ambos agitadores se encuentran en funcionamiento.

BIBLIOGRAFÍA:

^[1] Behr, M.; Hastreiter, D.; Mittal, S.; Tezduyar, T.E. (1996); Incompressible flow past a circular cylinder: dependence of computed flow field on the location of the lateral boundaries. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 123, pp 309-316



- [2] Chung, J.; Hulbert, G.M. (1993); A time integration algorithm for structural dynamics with improved numerical dissipation: The generalized- α method. *Journal of Applied Mechanics*, 60, pp 371-375
- [3] Clift, R.; Grace, J.R.; Weber, M.E. (1978); *Bubbles, Drops and Particles*. Academic Press London. ISBN 012176950X
- [4] Comsol 4.1: CFD Module User's Guide (2010). Comsol Handbook Series
- [5] Diez-Montero, R. (2015); *Anoxan: A novel anaerobic-anoxic reactor for biological nutrient removal from wastewater*. Tesis Doctoral, Universidad de Cantabria, pp 42-52
- [6] Diez-Montero, R.; De Florio, L.; González-Viar, M.; Volcke, E.I.P.; Tejero, I. (2015); Feasibility of hydraulic separation in a novel anaerobic-anoxic upflow reactor for biological nutrient removal. *Bioprocess Biosyst Eng*, Vol. 38, pp 93-103
- [7] Diez-Montero, R.; De Florio, L.; González-Viar, M.; Herrero, M.; Tejero, I. (2016); Performance evaluation of a novel anaerobic-anoxic sludge blanket reactor for biological nutrient removal treating municipal wastewater. *Bioresource Technology*, Vol. 209, pp 195-204
- [8] Directiva 2000/60/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 23 de octubre de 2000 (DMA)
- [9] Directiva 91/271/CE del Consejo, de 21 de mayo de 1991, sobre el tratamiento de aguas residuales urbanas
- [10] Dussud, J.; Diez-Montero, R.; Tejero, J.I. (2015); *Modélisation et optimisation de réacteurs de type AnoxAn avec le logiciel COMSOL*. Rapport de Stage Pratique de l'Ingenierie, Escuela Técnica Superior de Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos (Santander).
- [11] *Essentials of Postprocessing and Visualization in COMSOL Multiphysics* (2014). Comsol Handbook Series
- [12] Fernández Oro, J.M. (2012); *Técnicas numéricas en ingeniería de fluidos: Introducción a la dinámica de fluidos computacional (CFD) por el método de volúmenes finitos*. Editorial Reverte. ISBN 9788429126020
- [13] *Introduction to COMSOL Multiphysics 5.1* (2015). Comsol Handbook Series
- [14] Jansen, K.E.; Whiting, C.H.; Hulbert, G.M. (2000); A generalized- α method for integrating the filtered Navier-Stokes equations with a stabilized finite element method. *Rensselaer Polytechnic Institute and University of Michigan*
- [15] Johnson, A.A.; Tezduyar, T.E (1994); Mesh update strategies in parallel finite element computations of flow problems with moving boundaries and interfaces. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 119, pp 73-94
- [16] Laurent, J.; Samstag, R.W.; Ducoste, J.M.; Griborio, A.; Nopens, I.; Batstone, D.J.; Wicks, J.D., Saunders, S., Potier, O. (2014); A protocol for the use of computational fluid dynamics as supportive tool for wastewater treatment plant modelling. *Water Science and Technology*, 70.10, pp 1575-1584.
- [17] Pryor, R.W. (2012); *Multiphysics modelling using COMSOL 4*. Mercury Learning and Information. ISBN 9781936420094
- [18] Shakib, F.; Hughes, T.J.R. (1991); A new finite element formulation for computational fluid dynamics: IX. Fourier analysis of space-time Galerkin/least-squares algorithms. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 87, pp 35-58
- [19] Shakib, F.; Hughes, T.J.R. (1991); A new finite element formulation for computational fluid dynamics: X. The compressible Euler and Navier-Stokes equations. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 89, pp 141-219
- [20] Tabatabaian, M. (2014); *COMSOL for engineers*. Mercury Learning and Information. ISBN 9781938549533



- [21] Tejero, J.I.; Diez, R.; Esteban, A.L.; Lobo, A.; Temprano, J.; Rodríguez, L. (2010); Reactor biológico anóxico-anaerobio para la eliminación de nutrientes de aguas residuales. Patente Española ES2338979B2
- [22] Tejero, J.I.; Santamaría, C. (1996); Proceso de tratamiento biológico de aguas basado en biopelícula sobre soporte de diseño específico. Patente Española ES2128962B1
- [23] Tezduyar, T.E.; Behr, M.; Liou, J. (1992); New strategy for finite element computations involving moving boundaries and interfaces. The deforming-spatial-domain/space-time procedure. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 94, pp 339-351
- [24] Wörner, M. (2003); A compact introduction to the numerical modelling of multiphase flows. Institut für Reaktorsicherheit Programm Nukleare Sicherheitsforschung.
- [25] Zabaleta, L.; Diez-Montero, R.; Gonzalez, M.; Tejero, J.I. (2014); Diseño y optimización de un reactor anaerobio-anóxico para la eliminación de nutrientes de aguas residuales aplicable a depuración de mediana y gran escala mediante modelización física. Proyecto Fin de Carrera, Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos (Santander).



MASTER FINAL THESIS TITLE:

Hydrodynamic analysis of an innovative biological reactor for nutrient removal in wastewater treatment by modelling.

AUTHOR: Ricardo Blanco Aguilera

DIRECTED BY: Rubén Díez Montero
Juan Ignacio Tejero Monzón

DATE: July 2016

KEYWORDS:

Wastewater treatment, biological nutrient removal, anoxic-anaerobic biological reactor, modelling, hydrodynamics, computational fluid dynamics.

ABSTRACT:

In this paper it has been analysed the hydrodynamic behaviour of an innovative biological reactor for nutrient removal in wastewater treatment called AnoxAn by modelling and simulating. AnoxAn integrates the aerobic and anaerobic zones needed for phosphorus and nitrogen biological removal. The reactor, with upflow operation and sludge blanket, is divided vertically with the anoxic zone up the anaerobic. The anoxic zone receives a nitrate-rich recycle from a subsequent aerobic reactor, giving the denitrification conditions while the hydraulic separation between the zones in the reactor must guarantee the absence of nitrates in the anaerobic zone. To reach this objective, they are used baffles and deflectors.

It has been used Computational Fluid Dynamics to build and simulate a 2D model of the reactor. Firstly, it has been analysed the hydrodynamic behaviour without agitation, and then, the intermittent behaviour of baffles has been added. It has been observed that the intermittent operation of the anoxic baffle is the element that supposes the biggest computational difficulty, and therefore have been compared different algorithms to select the resolution that suits best the study case. This has enabled to optimize the model, reducing the resolution time more than 50% reaching the same results.

The mains results show that when both baffles are working at the same time, the system reaches a high hydraulic separation between the anoxic and anaerobic zones. However, when the anoxic baffle stops its operation, the high suction of the anaerobic baffle influences the entire upper compartment, mixing the contents of the anoxic zone in the anaerobic zone. In conclusion, the hydraulic separation between the anoxic and anaerobic zones can be reached because of the high suction velocity of the baffles, being the deflector and the soothing less important for this purpose than expected and reaching the highest efficiency when both baffles, anoxic and anaerobic, are working simultaneously.

BIBLIOGRAPHY:

^[1] Behr, M.; Hastreiter, D.; Mittal, S.; Tezduyar, T.E. (1996); Incompressible flow past a circular cylinder: dependence of computed flow field on the location of the lateral boundaries. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 123, pp 309-316

^[2] Chung, J.; Hulbert, G.M. (1993); A time integration algorithm for structural dynamics with improved numerical dissipation: The generalized- α method. *Journal of Applied Mechanics*, 60, pp 371-375



- [3] Clift, R.; Grace, J.R.; Weber, M.E. (1978); Bubbles, Drops and Particles. Academic Press London. ISBN 012176950X
- [4] Comsol 4.1: CFD Module User's Guide (2010). Comsol Handbook Series
- [5] Diez-Montero, R. (2015); Anoxan: A novel anaerobic-anoxic reactor for biological nutrient removal from wastewater. Tesis Doctoral, Universidad de Cantabria, pp 42-52
- [6] Diez-Montero, R.; De Florio, L.; González-Viar, M.; Volcke, E.I.P.; Tejero, I. (2015); Feasibility of hydraulic separation in a novel anaerobic-anoxic upflow reactor for biological nutrient removal. *Bioprocess Biosyst Eng*, Vol. 38, pp 93-103
- [7] Diez-Montero, R.; De Florio, L.; González-Viar, M.; Herrero, M.; Tejero, I. (2016); Performance evaluation of a novel anaerobic-anoxic sludge blanket reactor for biological nutrient removal treating municipal wastewater. *Bioresource Technology*, Vol. 209, pp 195-204
- [8] Directiva 2000/60/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 23 de octubre de 2000 (DMA)
- [9] Directiva 91/271/CE del Consejo, de 21 de mayo de 1991, sobre el tratamiento de aguas residuales urbanas
- [10] Dussud, J.; Diez-Montero, R.; Tejero, J.I. (2015); Modélisation et optimisation de réacteurs de type AnoxAn avec le logiciel COMSOL. Rapport de Stage Pratique de l'Ingenierie, Escuela Técnica Superior de Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos (Santander).
- [11] Essentials of Postprocessing and Visualization in COMSOL Multiphysics (2014). Comsol Handbook Series
- [12] Fernández Oro, J.M. (2012); Técnicas numéricas en ingeniería de fluidos: Introducción a la dinámica de fluidos computacional (CFD) por el método de volúmenes finitos. Editorial Reverte. ISBN 9788429126020
- [13] Introduction to COMSOL Multiphysics 5.1 (2015). Comsol Handbook Series
- [14] Jansen, K.E.; Whiting, C.H.; Hulbert, G.M. (2000); A generalized- α method for integrating the filtered Navier-Stokes equations with a stabilized finite element method. Rensselaer Polytechnic Institute and University of Michigan
- [15] Johnson, A.A.; Tezduyar, T.E (1994); Mesh update strategies in parallel finite element computations of flow problems with moving boundaries and interfaces. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 119, pp 73-94
- [16] Laurent, J.; Samstag, R.W.; Ducoste, J.M.; Griborio, A.; Nopens, I.; Batstone, D.J.; Wicks, J.D., Saunders, S., Potier, O. (2014); A protocol for the use of computational fluid dynamics as supportive tool for wastewater treatment plant modelling. *Water Science and Technology*, 70.10, pp 1575-1584.
- [17] Pryor, R.W. (2012); Multiphysics modelling using COMSOL 4. Mercury Learning and Information. ISBN 9781936420094
- [18] Shakib, F.; Hughes, T.J.R. (1991); A new finite element formulation for computational fluid dynamics: IX. Fourier analysis of space-time Galerkin/least-squares algorithms. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 87, pp 35-58
- [19] Shakib, F.; Hughes, T.J.R. (1991); A new finite element formulation for computational fluid dynamics: X. The compressible Euler and Navier-Stokes equations. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 89, pp 141-219
- [20] Tabatabaian, M. (2014); COMSOL for engineers. Mercury Learning and Information. ISBN 9781938549533
- [21] Tejero, J.I.; Diez, R.; Esteban, A.L.; Lobo, A.; Temprano, J.; Rodriguez, L. (2010); Reactor biológico anóxico-anaerobio para la eliminación de nutrientes de aguas residuales. Patente Española ES2338979B2



- [22] Tejero, J.I.; Santamaría, C. (1996); Proceso de tratamiento biológico de aguas basado en biopelícula sobre soporte de diseño específico. Patente Española ES2128962B1
- [23] Tezduyar, T.E.; Behr, M.; Liou, J. (1992); New strategy for finite element computations involving moving boundaries and interfaces. The deforming-spatial-domain/space-time procedure. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 94, pp 339-351
- [24] Wörner, M. (2003); A compact introduction to the numerical modelling of multiphase flows. Institut für Reaktorsicherheit Programm Nukleare Sicherheitsforschung.
- [25] Zabaleta, L.; Diez-Montero, R.; Gonzalez, M.; Tejero, J.I. (2014); Diseño y optimización de un reactor anaerobio-anóxico para la eliminación de nutrientes de aguas residuales aplicable a depuración de mediana y gran escala mediante modelización física. Proyecto Fin de Carrera, Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos (Santander).



ÍNDICE GENERAL

1	INTRODUCCIÓN	12
1.1.	MARCO GENERAL.....	12
1.2.	ANOXAN	12
1.3.	OBJETIVOS	13
2	MATERIALES Y MÉTODOS	14
2.1.	ANOXAN-II	14
2.2.	HERRAMIENTA: DINÁMICA DE FLUIDOS COMPUTACIONAL.....	15
2.3.	MODELIZACIÓN	16
3	RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	20
3.1.	EVALUACIÓN PRELIMINAR DEL COMPORTAMIENTO HIDRODINÁMICO SIN AGITACIÓN.....	20
3.2.	COMPARACIÓN Y SELECCIÓN DE MÉTODOS Y ALGORITMOS DE RESOLUCIÓN .	21
3.3.	ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO HIDRODINÁMICO CON AGITACIÓN INTERMITENTE	23
3.4.	EVALUACIÓN DE LA SEPARACIÓN HIDRÁULICA	26
3.5.	INTRODUCCIÓN DE SÓLIDOS EN SUSPENSIÓN EN EL MODELO.....	29
4	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	30
5	REFERENCIAS	31



LISTADO DE FIGURAS

Figura N°1 – Esquema general AnoXan.....	13
Figura N°2 – Esquema general AnoXan II.....	14
Figura N°3 – Deflector.....	14
Figura N°4 – Esquema Tranquilizador BLAS.....	15
Figura N°5 – Esquema posicionamiento Tranquilizador BLAS.....	15
Figura N°6 – Protocolo a seguir para el uso de CFD como herramienta en modelización de Tratamiento de A.R.....	16
Figura N°7 – Cronología modelización.....	17
Figura N°8 – Modelización agitadores.....	18
Figura N°9 – Modelización deflector.....	19
Figura N°10 – Modelización Tranquilizador BLAS.....	19
Figura N°11 – Función unitaria para agitador anóxico.....	19
Figura N°12 – Función analítica para agitador anóxico.....	19
Figura N°13 – Variable de velocidad para agitador anóxico.....	19
Figura N°14 – Hidrodinámica preliminar: Campo y vector de velocidades.....	20
Figura N°15 – Comprobación velocidad de salida.....	20
Figura N°16 – Comprobación velocidad de entrada.....	21
Figura N°17 – Comparativa iteración para diferentes métodos numéricos de resolución.....	22
Figura N°18 – Comparativa resultados para diferentes métodos numéricos de resolución.....	23
Figura N°19 – Hidrodinámica para t = 1s: Campo y vector de velocidades.....	23
Figura N°20 – Hidrodinámica para t = 10s: Campo y vector de velocidades.....	24
Figura N°21 – Hidrodinámica para t = 11s: Campo y vector de velocidades.....	24
Figura N°22 – Hidrodinámica para t = 30s: Campo y vector de velocidades.....	25
Figura N°23 – Hidrodinámica para t = 91s: Campo y vector de velocidades.....	25
Figura N°24 – Hidrodinámica para t = 100s: Campo y vector de velocidades.....	26
Figura N°25 – Líneas de corriente para t = 1s.....	26
Figura N°26 – Líneas de corriente para t = 10s.....	27
Figura N°27 – Líneas de corriente para t = 11s.....	27



Figura N°28 – Líneas de corriente para $t = 30s$28

Figura N°29 – % Separación Hidráulica en el tiempo.....28

Figura N°30 - % Clarificación en el tiempo.....28

LISTADO DE TABLAS

Tabla N°1 – Propiedades Tranquilizador BLAS.....15

Tabla N°2 – Ventajas e inconvenientes del empleo del CFD.....16

Tabla N°3 – Análisis de diferentes flujos del reactor.....17

1 INTRODUCCIÓN

1.1. **MARCO GENERAL**

El control en la depuración de las aguas residuales ha ido aumentando paulatinamente en las últimas décadas, y así lo reflejan las diferentes directivas europeas ^{[8][9]}, las cuales buscan controlar el estado de las aguas continentales, costeras y subterráneas para lograr un uso sostenible, proteger y mejorar los recursos hídricos. Las zonas declaradas como *sensibles* en dichas directivas, obligan a realizar un tratamiento terciario a las aguas residuales urbanas para la eliminación de nitrógeno y fósforo antes de su vertido en dichas zonas.

Históricamente, la mayoría de las Estaciones Depuradoras de Aguas Residuales (EDAR-s) construidas en España y Europa llevaban a cabo simplemente un tratamiento secundario de eliminación de materia orgánica. A este respecto, y teniendo en cuenta que cada vez son más las zonas declaradas como *sensibles*, las directivas europeas obligan a todas esas EDAR-s a ampliar la línea de tratamiento para poder adaptarse a las exigencias vigentes, suponiendo casi siempre un problema de espacio e inversión.

Además, a pesar de que la depuración en medianos y grandes núcleos está prácticamente resuelta, aún queda pendiente la depuración de numerosas pequeñas poblaciones en las que habrá que incluir una línea de eliminación de nutrientes.

Teniendo todo lo anterior en cuenta, sale a la vista la necesidad de soluciones compactas que presenten una mínima necesidad de superficie.

1.2. **ANOXAN**

La depuración de nutrientes puede abordarse mediante tratamiento químico o biológico. El tratamiento biológico para la eliminación de nutrientes (EBN) conlleva la ventaja de que elimina la necesidad del empleo de reactivos, reduciendo el coste de operación y obteniendo un fango libre de químicos.

Las configuraciones comúnmente empleadas en la EBN, basadas en el proceso de fangos activos, están ampliamente desarrolladas y establecidas. Sin embargo, presentan varias limitaciones entre las que cabe destacar el complejo sistema de tratamiento y la elevada ocupación de espacio,

debido a que son necesarias combinaciones de reactores anaerobios, anóxicos y aerobios para llevar a cabo la nitrificación, desnitrificación y la eliminación biológica de fósforo, llegando a multiplicar hasta por 4 la superficie necesaria para un proceso de eliminación de materia orgánica, lo cual corre en contra de las necesidades actuales anteriormente detalladas.

En este contexto, el Grupo de Ingeniería Ambiental (GIA) de la Universidad de Cantabria ha desarrollado y patentado un reactor anaerobio-anóxico para EBN denominado AnoxAn (patente ES2338979B2) ^[21].

AnoxAn nace con el objetivo de unificar las zonas anaerobia y anóxica en un único reactor para lograr un sistema compacto y eficiente energéticamente, cuya aplicación está orientada a aquellos casos de ampliación de EDAR existentes, o construcción de nuevas plantas, en los que la disponibilidad de espacio es limitada. Para completar el tren de tratamiento, el funcionamiento biológico anaerobio-anóxico de AnoxAn se combina con un reactor aerobio (para eliminación de materia orgánica restante, acumulación de fosfato y nitrificación) y un decantador secundario (o filtración). Desde este reactor aerobio nitrificante se recircula a la zona anóxica de AnoxAn una corriente rica en nitrato, proporcionando las condiciones necesarias para la desnitrificación.

Las principales características específicas del reactor AnoxAn son: (i) operación en flujo ascendente; (ii) separación hidráulica entre zonas anóxica y anaerobia, y (iii) retención de sólidos en suspensión. Tales características consiguen una reducción en la necesidad de espacio, proporcionando un sistema compacto y de elevada eficiencia. En primer lugar, la operación en flujo ascendente reduce las necesidades energéticas para mezclado, y permite mantener elevada concentración de fango en el reactor. En cuanto a la separación hidráulica, es necesaria para establecer condiciones ambientales diferenciadas en las zonas anóxica y anaerobia, es decir, mantener una concentración despreciable de nitrato en la zona anaerobia. Para lograr la separación hidráulica se disponen equipos de mezcla independientes para cada zona, cuyo objetivo es mantener la biomasa en suspensión evitando su sedimentación y proporcionar un contacto adecuado entre el agua residual y la biomasa en cada zona. Se debe evitar

una energía de mezcla excesiva para mantener la separación hidráulica entre zonas, lo cual se puede conseguir mediante funcionamiento intermitente de los equipos de mezcla. Adicionalmente, con el objetivo de reducir las corrientes de mezcla entre ambas zonas y mejorar la separación hidráulica, se dispone un deflector entre las zonas anaerobia y anóxica, bien como una estructura perimetral o una red o malla cuyos huecos permitan la circulación del agua y los sólidos en suspensión. Por último, la retención de sólidos dentro del reactor tiene como objetivo alcanzar una elevada concentración de biomasa. El flujo ascendente permite cierta retención de biomasa, y es ayudado por un deflector instalado en la zona superior del reactor. Este deflector consiste en una estructura tranquilizadora o un conjunto de lamelas que proporcionan condiciones adecuadas para la sedimentación de los sólidos en suspensión. De esta manera, se establece una zona superior de tranquilización o clarificación que evita un gran escape de biomasa del reactor. Por todo lo anterior, la principal ventaja del reactor AnoxAn es la simplicidad, elevada eficiencia y compacidad ^[5].

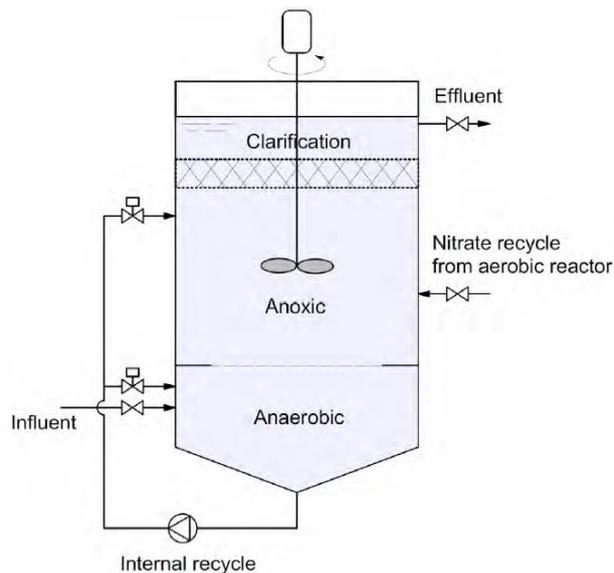


Figura N°1 – Esquema del reactor AnoxAn

La capacidad de AnoxAn de establecer dos zonas hidráulicamente separadas dentro de un único reactor fue evaluada mediante ensayos de caracterización hidráulica de un prototipo piloto (volumen de 50 L) y modelización por conjunto de compartimentos. Se consiguió el comportamiento hidráulico deseado, es decir, mezcla reducida entre ambas zonas y concentración despreciable de

nitrito en la zona anaerobia ^[6]. El mismo prototipo fue posteriormente operado tratando agua residual real, combinado con un reactor aerobio, mostrando unos resultados excelentes en cuanto a eliminación biológica de nutrientes ^[7].

Sin embargo, cabe destacar que las evaluaciones del reactor AnoxAn han sido llevadas a cabo con un prototipo de forma y dimensiones específicas. De acuerdo a su configuración, se considera que podría ser aplicable para depuración en pequeñas poblaciones. La implementación en EDAR de medio y gran tamaño conllevaría la construcción de múltiples unidades modulares del reactor AnoxAn, lo cual puede no ser óptimo desde el punto de vista técnico y económico. Por lo tanto, actualmente el GIA se encuentra desarrollando nuevas configuraciones de AnoxAn, manteniendo las mismas características, pero con diferentes formas y dimensiones. Se considera que el estudio de la hidrodinámica de estas nuevas configuraciones mediante ensayos experimentales y simulación de modelos es una etapa crucial para evaluar su viabilidad y escalabilidad. Tales nuevas configuraciones pretenden ser similares a típicos reactores de fangos activos, con el objetivo de facilitar la aplicabilidad a escala real del concepto AnoxAn, por ejemplo en casos de ampliación de EDAR existentes.

1.3. OBJETIVOS

Es objeto del presente trabajo, es el análisis de la hidrodinámica de un reactor escalable, AnoxAn-II, mediante modelización empleando Dinámica de Fluidos Computacional (CFD) y así complementar ensayos experimentales de laboratorio que puedan realizarse sobre el mismo modelo.

De este objetivo general, nacen otras metas específicas que deben cumplirse:

- Análisis del comportamiento hidrodinámico del reactor sin agitación
- Comparación y selección de los métodos numéricos que mejor se ajusten al proceso simulado
- Análisis del comportamiento hidrodinámico del reactor con agitación intermitente
- Evaluación de la separación hidráulica entre los sectores anóxico y anaerobio.

2 MATERIALES Y MÉTODOS

2.1. ANOXAN-II

El reactor AnoxAn-II es una variación del prototipo original de AnoxAn adaptado para poder ser escalable a media y gran escala. Consiste en un reactor de planta rectangular semejante a los reactores biológicos de fangos activos. Las zonas anaerobia y anóxica disponen de agitadores de eje horizontal independientes, y el deflector que separa ambas zonas consiste en un conjunto de lamas horizontales. Se ha construido un prototipo de AnoxAn-II a escala piloto que representa una sección o “rebanada” de un reactor completo. A continuación se procede a definir todas las características físicas del mismo, así como los parámetros de caudales y diferentes elementos que lo componen.

Las dimensiones útiles del reactor piloto son de $0,3 \times 0,65 \times 0,74 \text{ m}^3$, con 3 zonas dispuestas verticalmente:

Zona Anaerobia (ANAE)

- Situada en la zona inferior del reactor, con una altura de $h \approx 0,2 \text{ m}$.
- Agitador FluidMix HPS3-02 01 B 00 (PS)/15,6 (0,25 kW) en funcionamiento continuo a 280 rpm ($Q = 12,1 \text{ m}^3/\text{h}$). Hélice de 100 mm de diámetro situada a 12 cm de la pared y centrada a media altura de la zona.
- Recibe el caudal afluyente ($Q = 35 \text{ L/h}$). Entrada a 4 cm de altura desde la base del reactor.

Zona Anóxica (ANOX)

- Situada en la zona intermedia del reactor, con una altura $h \approx 0,35 \text{ m}$. Separada de la zona anaerobia mediante un deflector.
- Agitador FluidMix HPS3-00 17 B 150/015,6 (0,12 kW) en funcionamiento intermitente a 170 rpm ($Q = 7,5 \text{ m}^3/\text{h}$). Hélice de 100 mm de diámetro situada a 10 cm de la pared y centrada a media altura de la zona. Ciclo de funcionamiento: $t_{\text{ON}} = 10 \text{ s} + t_{\text{OFF}} = 80 \text{ s}$.
- Recibe el caudal de recirculación de nitrato ($Q = 100 \text{ L/h}$) que se bombea desde el decantador posterior. Entrada a mitad de

altura de la zona anóxica (17,5 cm por encima del deflector y 17,5 cm por debajo del tranquilizador).

Zona clarificación (CLAR)

- Situada en la zona superior del reactor de altura $h \approx 0,2 \text{ m}$. Separada de la zona anóxica mediante un tranquilizador.
- Sin agitación.
- Salida por orificios en canaleta superior. 10 orificios de 10 mm de diámetro, distanciados 60 mm entre ellos (en los extremos 55 mm hasta la pared del reactor).

A continuación se muestra el esquema de una sección longitudinal del reactor (en 2D) empleado para la modelización:

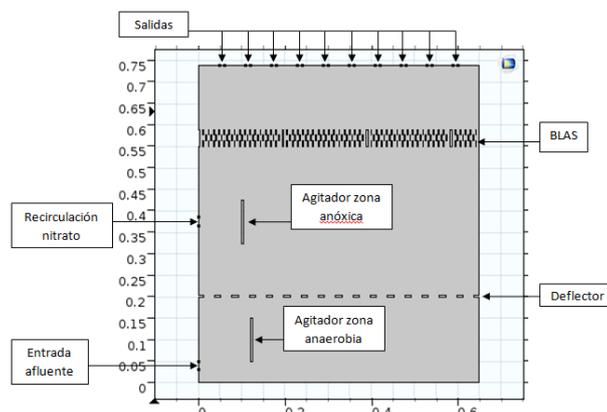


Figura N°2 – Esquema general AnoxAn II

Para la separación hidráulica entre la zona anaerobia y anóxica se emplea el deflector con el siguiente esquema:

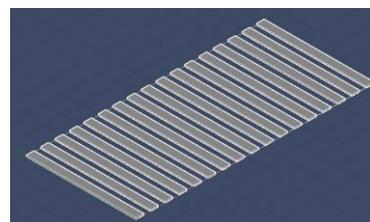


Figura N°3 – Deflector

El deflector consiste en ranuras de 2,5 cm para el paso del agua, intercaladas con 1,5 cm de deflector, por lo que habrá una separación de 4 cm entre centros de deflectores.

Para la separación hidráulica entre la zona anóxica y la de clarificación se empleará el Tranquilizador BLAS [22]. El esquema es el siguiente (cotas en cm):

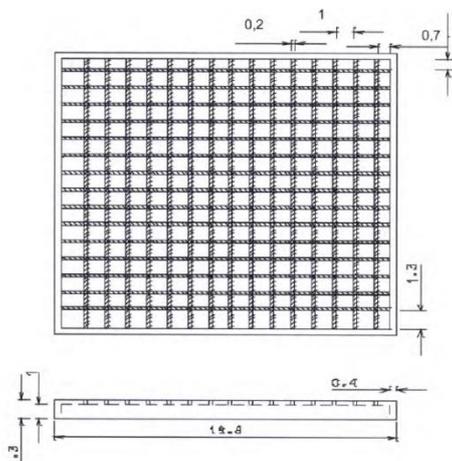


Figura N°4 – Esquema Tranquilizador BLAS

Las características del soporte son las siguientes:

Tabla N°1 – Propiedades Tranquilizador BLAS

PROPIEDAD	UNIDADES	DESCRIPCIÓN
Material	-	Polietileno
Densidad	kg/m ³	950
Superficie específica útil	m ² /m ³	121,8
Índice de huecos	%	86,4
Lateral del cuadrado	mm	198
Resistencia a la tensión	MN/m ²	32
Módulo de flexión	GN/m ²	1,2
Elongación a la rotura	%	150

Para una óptima tranquilización y separación hidráulica entre ambas zonas se colocarán 3 piezas de BLAS superpuestas una encima de la otra de manera opuesta, es decir, de forma que cada arista de unión de los rectángulos quede en medio del hueco de los rectángulos del BLAS superior.

En la figura 5 se muestra la diferencia entre superponer los diferentes BLAS de manera opuesta o paralela. Como se ha explicado, colocándolos de manera opuesta se obtiene un camino más tortuoso para el fluido facilitando la tranquilización deseada.

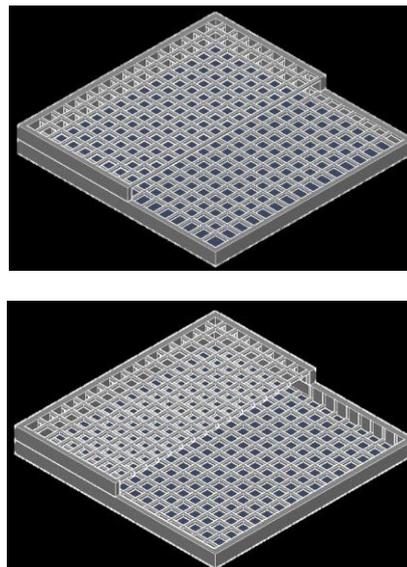


Figura N°5 – Esquema posicionamiento Tranquilizador BLAS

2.2. HERRAMIENTA: DINÁMICA DE FLUIDOS COMPUTACIONAL

Para la modelización del reactor AnoxAn se han empleado técnicas de CFD. Las técnicas numéricas en Ingeniería han experimentado un gran desarrollo en las últimas décadas, siendo concretamente la Mecánica de Fluidos una de las disciplinas donde este auge ha tenido una mayor repercusión [12].

Las ecuaciones generales de la Mecánica de Fluidos no admiten soluciones generales analíticas. Por esta razón, su estudio se ha abordado desde diferentes puntos de vista, tales como la experimentación, el análisis dimensional o el análisis matemático simplificado. Con la evolución de los computadores desde la mitad del siglo pasado, se ha añadido una nueva técnica de análisis: el estudio computacional de los flujos, comúnmente conocido como Dinámica de Fluidos Computacional [12].

Hoy en día, su uso está expandido a numerosas aplicaciones: industrias automovilística, aeroespacial y aeronáutica, naval, química, nuclear, biomédica y también a numerosas aplicaciones de Ingeniería Civil como el impacto eólico en torres, esfuerzos en plataformas offshore o análisis aeroelástico en puentes colgantes.

Las técnicas de CFD ofrecen numerosas ventajas, pero también inconvenientes que se resumen en la siguiente tabla:

Tabla N°2 – Ventajas e inconvenientes del empleo del CFD

VENTAJAS	INCONVENIENTES
Reducción sustancial de tiempos y costes en los nuevos diseños	Técnicas caras: Máquinas con gran capacidad de cálculo, programas con un precio no asequible al público
Posibilidad de analizar sistemas o condiciones muy difíciles de reproducir experimentalmente	Se necesita personal cualificado para ejecutar programas, definir modelos y analizar soluciones
Capacidad de estudiar sistemas bajo condiciones peligrosas	No siempre es posible obtener resultados lo suficientemente precisos
Nivel de detalle prácticamente ilimitado	Limitación para los modelos existentes para la turbulencia, combustión o flujos multifásicos
Diseño asistido por ordenador	Tendencia a creerse los resultados sin suficiente contrastación

2.3. MODELIZACIÓN

Estrategia

Las técnicas de CFD son cada vez más utilizadas para la modelización y simulación de Tratamientos de Aguas Residuales. A continuación se muestra un protocolo orientativo a seguir a la hora de abordar un problema de CFD en este tipo de procesos ^[16]:

- 1) Formulación del modelo de CFD. Desarrollo del modelo de CFD detallando geometría, condiciones de contorno y características físicas, químicas o biológicas como pueden ser la turbulencia, el modelo de sólidos o la biocinética.
- 2) Recopilación de datos. Obtención de datos experimentales que puedan contrastar los obtenidos mediante la modelización.
- 3) Validación del modelo de CFD construido mediante comparativa de resultados y datos experimentales.
- 4) Comparación con modelos más simples con el objetivo de identificar posibles defectos en el modelo.

- 5) Corrección de defectos para la mejora del modelo y poder avanzar hacia uno más completo si fuese necesario.

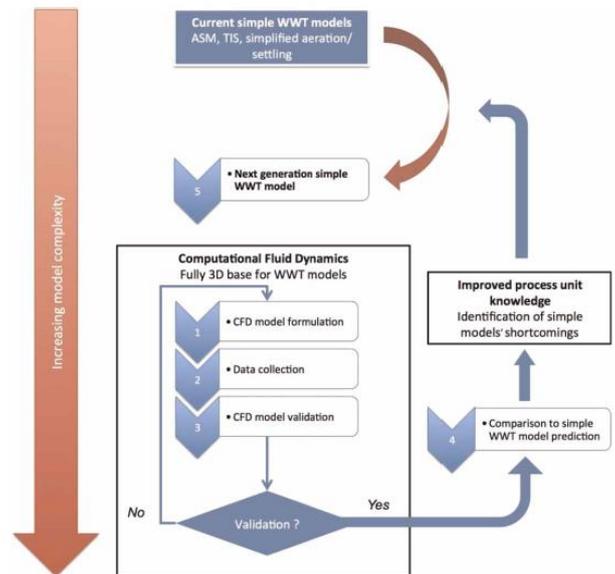


Figura N°6 – Protocolo a seguir para el uso de CFD como herramienta en modelización de Tratamiento de Aguas Residuales ^[16]

Tomando el protocolo anterior como referencia, a continuación se propone una variante para la modelización de AnoxAn-II.

En otros trabajos del GIA con herramientas de CFD y AnoxAn ^{[10][25]}, se abordó el problema directamente en 3D. Debido a los problemas para interpretar resultados, así como a la aparición de resultados erróneos, se decide abordar el análisis de AnoxAn-II mediante una modelización en 2D.

Además de ello, la modelización en 2D se realizará en distintas fases, es decir, se comenzará realizando un modelo muy sencillo y se validarán sus resultados, añadiendo poco a poco el resto de elementos que componen el reactor. La metodología para el estudio de la hidrodinámica es la siguiente:

- 1) Construir el modelo únicamente con la geometría del reactor, con sus condiciones de contorno de entrada y salida.
- 2) Incorporar el deflector de separación entre zonas anóxica y anaerobia.
- 3) A continuación, incorporar el Tranquilizador BLAS superior.

- 4) Incorporar el funcionamiento del agitador de la zona anaerobia (funcionamiento en continuo).
- 5) Por último, incorporar el agitador de la zona anóxica (funcionamiento intermitente).

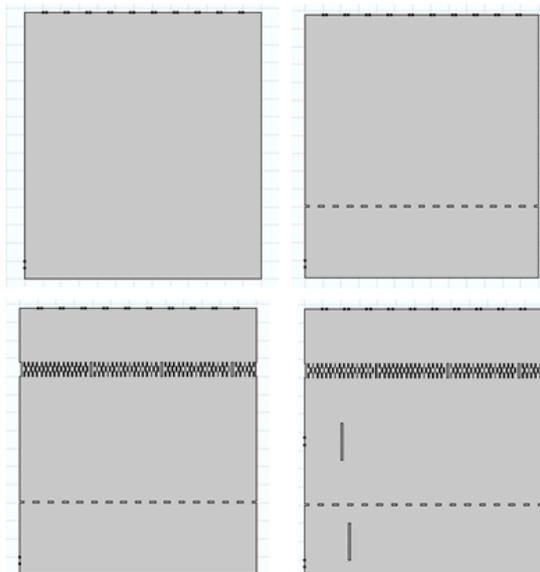


Figura N°7 – Metodología de Modelización

Una vez estudiada y validada la hidrodinámica, el objetivo es introducir los sólidos en suspensión como una fase dispersa en el fluido.

Por otra parte, con la intención de cumplir todos los objetivos marcados, debe existir a su vez una metodología específica para el análisis completo de la hidrodinámica:

- 1) En primer lugar, estudiar el reactor sin el efecto de los agitadores para entender el comportamiento hidrodinámico general del mismo.
- 2) A continuación, debido a la complicación progresiva del modelo, deben estudiarse y analizarse diferentes métodos numéricos de resolución para lograr optimizar el cálculo computacional lo máximo posible.
- 3) Una vez hallado un algoritmo de resolución numérica que satisfaga las necesidades del proceso, se estudiará la hidrodinámica del reactor con agitación intermitente.
- 4) Por último, se evaluará la separación hidráulica entre las zonas anóxica y anaerobia del reactor. Para cuantificar el alcance de la separación hidráulica entre las zonas anóxica y anaerobia, se han

contabilizado las líneas de corriente con origen en la zona anóxica que circulan hacia la zona anaerobia. Para ello, se utilizará la siguiente expresión:

$$S(\%) = 100 \cdot (N^\circ \text{ líneas de corriente} - N^\circ \text{ líneas de corriente invaden}) / N^\circ \text{ líneas de corriente}$$

Con ello se quiere expresar el porcentaje de líneas de corriente que no invaden la zona anaerobia respecto al número total de ellas.

Física del modelo

La física seleccionada para modelizar la hidrodinámica, es un modelo de turbulencia k-ε. Pese a que la velocidad de entrada del afluente es baja, la presencia de los agitadores y su rotación hace el que el flujo resulte caótico en ciertas zonas siendo el Número de Reynolds superior a 2.000. En la siguiente tabla se muestran los Números de Reynolds en las zonas de velocidad máxima, es decir, puntos de entrada de flujo y agitadores.

Tabla N°3 – Análisis de diferentes flujos del reactor

VARIABLE	AFLUENTE	RECIRC	AGIT. ANAE	AGIT. ANOX
Q (L/h)	35	100	12.100	7.500
Ø (cm)	2	2	10	10
A (m ²)	0,00031	0,00031	0,0078	0,0078
v (m/s)	0,031	0,088	0,428	0,265
v (m ² /s)	10 ⁻⁶	10 ⁻⁶	10 ⁻⁶	10 ⁻⁶
Re	618,9	1.768,4	42.795,0	26.525,8

Se observa que si no hubiese agitadores, el flujo en el reactor sería completamente laminar, con un comportamiento similar a una especie de decantador. Son los agitadores los que generan la mencionada turbulencia y por lo que se hace necesario un modelo de este tipo.

Frente a otros modelos de turbulencia como el k-ω, SST o Spalart-Allmaras, el k-ε presenta la ventaja de ser definido por ecuaciones más sencillas. Sin embargo, si se estuviesen analizando flujos de tipo industrial, el modelo seleccionado no sería el más adecuado^[12].

Las ecuaciones que rigen modelo de turbulencia k-ε son las siguientes:

$$\rho \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \rho(\mathbf{u} \cdot \nabla)\mathbf{u} = \nabla \cdot \left[-p\mathbf{I} + (\mu + \mu_T)(\nabla\mathbf{u} + (\nabla\mathbf{u})^T) \right] + \mathbf{F}$$

$$\rho \nabla \cdot (\mathbf{u}) = 0$$

$$\rho \frac{\partial k}{\partial t} + \rho(\mathbf{u} \cdot \nabla)k = \nabla \cdot \left[\left(\mu + \frac{\mu_T}{\sigma_k} \right) \nabla k \right] + P_k - \rho \epsilon$$

$$\rho \frac{\partial \epsilon}{\partial t} + \rho(\mathbf{u} \cdot \nabla)\epsilon = \nabla \cdot \left[\left(\mu + \frac{\mu_T}{\sigma_\epsilon} \right) \nabla \epsilon \right] + C_{\epsilon 1} \frac{\epsilon}{k} P_k - C_{\epsilon 2} \rho \frac{\epsilon^2}{k}$$

$$\mu_T = \rho C_\mu \frac{k^2}{\epsilon}$$

$$P_k = \mu_T \left[\nabla \cdot (\nabla \mathbf{u} + (\nabla \mathbf{u})^T) \right]$$

Materiales

El fluido que contiene el reactor será agua limpia. Para la física de simulación escogida, solamente es necesaria la definición de dos propiedades:

- Viscosidad dinámica. $\mu = 1,102 \cdot 10^{-3}$ Pa·s, a 20°C
- Densidad. $\rho = 1.000$ kg/m³

Condiciones de contorno

A continuación se especifican las características de las condiciones de contorno que gobiernan el modelo.

Entradas

Sabiendo el caudal de diseño y el diámetro del orificio, la condición de contorno de entrada se especifica en el modelo mediante la definición de la velocidad de la misma. Existen dos contornos de este tipo en el modelo:

- Entrada del afluente
- Entrada de recirculación de nitrato

Salidas

Para simular la salida del agua por los orificios de la zona de clarificación, se impone condición de contorno con presión nula.

Agitadores

Para analizar los agitadores, lo normal sería analizarlos en el plano perpendicular al del análisis del reactor, es decir, en el plano de giro de las aspas de los mismos. Es por ello, que el encontrar una

manera para modelizar su comportamiento en el plano de trabajo escogido supone un problema que debe ser resuelto.

Se observa que en el plano de trabajo, un agitador no es más que un contorno soplante por la parte frontal de las hélices y uno de succión o de aspiración por la parte contraria o trasera, tal y como se observa en la figura:

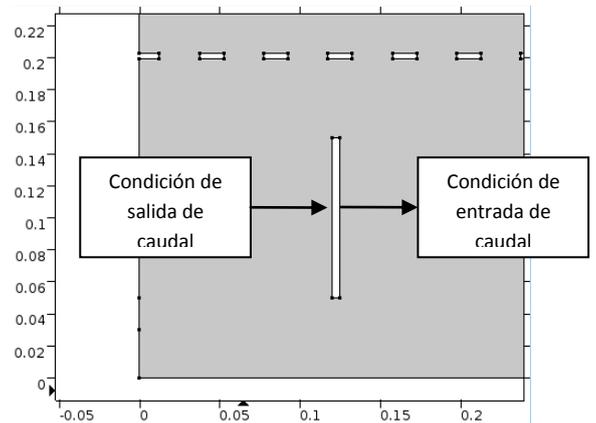


Figura N°8 – Modelización Agitadores

La parte derecha por tanto tendrá una condición de contorno de entrada análoga a las especificadas en el apartado 3.3.1, y la de la izquierda una condición de contorno de salida mediante velocidad.

Deflector y Tranquilizador BLAS

La parte sólida del deflector y del tranquilizador se simulan mediante la condición de contorno de pared. Se desestima la posibilidad de definir las características del material en el modelo por la poca o nula influencia que tendría en el resultado. El aspecto en el modelo es el que se muestra a continuación.

Deflector:

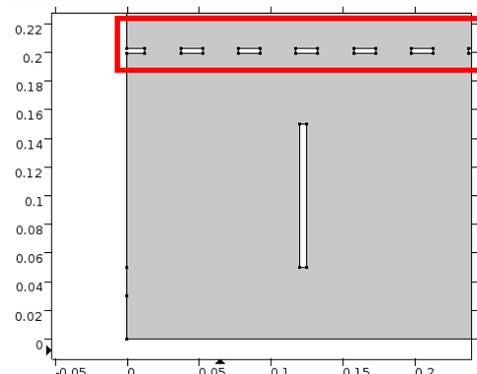


Figura N°9 – Modelización deflector



Tranquilizador BLAS:

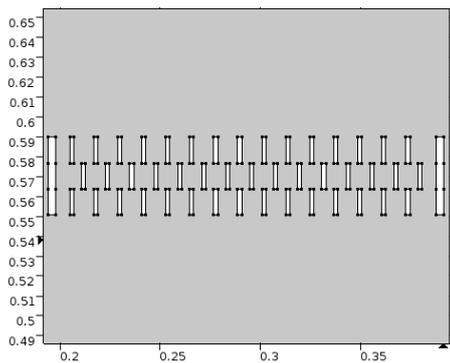


Figura N°10 – Modelización Tranquilizador BLAS

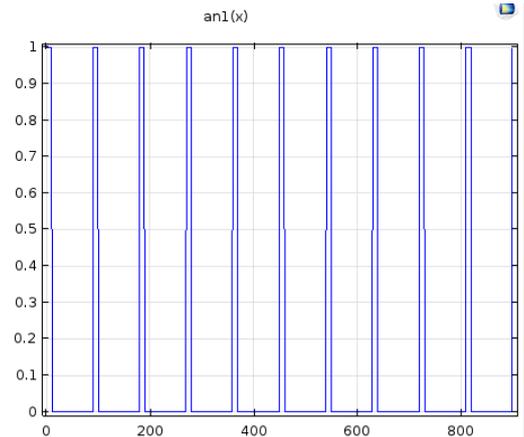


Figura N°12 – Función analítica para agitador anóxico

Intermitencia

Otra cuestión a resolver en la modelización del funcionamiento del reactor es la intermitencia en el funcionamiento del agitador anóxico. Para ello se siguen los siguientes pasos.

- Generación de una función unitaria por partes:

$$0s < t \leq 10s, pw1(t) = 1$$

$$10s < t \leq 90s, pw1(t) = 0$$

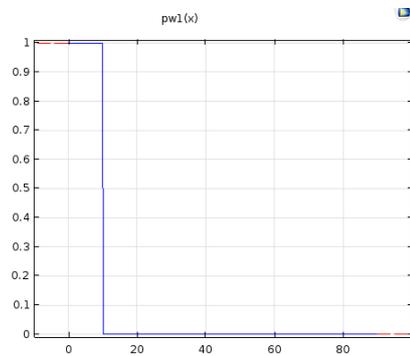


Figura N°11 – Función unitaria para agitador anóxico

- Por último, se crea una variable multiplicando la función an1(t) a la velocidad del agitador. Esa variable velocidad, será la que se exigirá en las condiciones de contorno soplante y succión del agitador.

Name	Expression	Unit	Description
Vanox	0.265[m/s]*an1(t[1/s])	m/s	Velocidad agitador anoxico

Figura N°13 – Variable de velocidad para agitador anóxico

Mallado

El mallado se ha construído de manera automática con COMSOL Multiphysics. El mallado resultante consiste de 64.749 elementos de dominio y 3.071 elementos de contorno.

3 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. EVALUACIÓN PRELIMINAR DEL COMPORTAMIENTO HIDRODINÁMICO SIN AGITACIÓN

Previamente a la colocación de los agitadores en el modelo, se ha llevado a cabo la valoración pertinente del modelo para comprobar la validez del mismo así como para interpretar el comportamiento hidrodinámico en condiciones de no agitación.

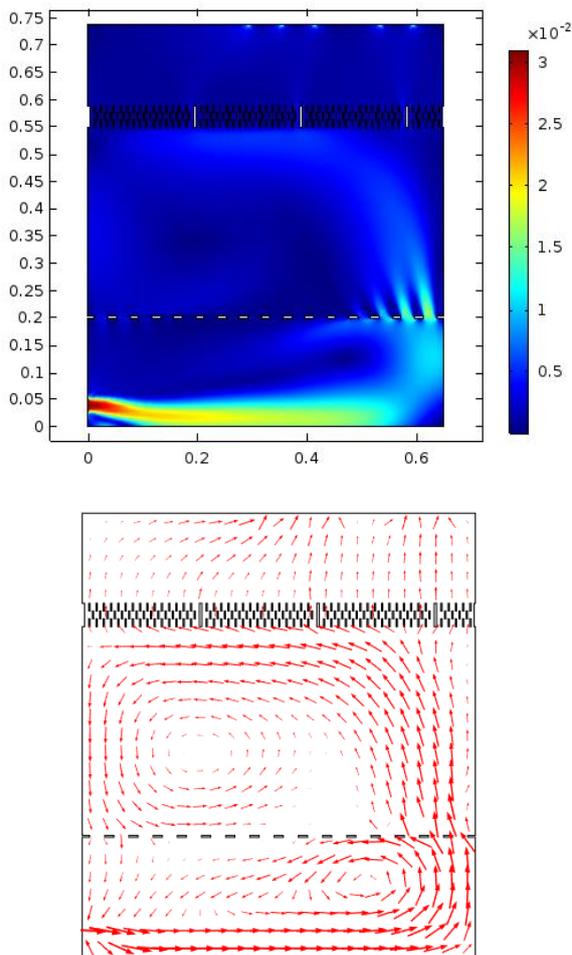


Figura N°14 – Hidrodinámica preliminar: Campo y vector de velocidades

En la Figura 14 se representa el campo de velocidades del reactor, en m/s, sin la presencia de los agitadores. Se observa como la velocidad es claramente superior en la zona anaerobia debido al efecto del afluente. Así mismo, el campo de velocidades es mayor en la parte derecha del reactor debido a la dirección del caudal de entrada.

El flujo bordea la parte derecha de la zona anaerobia y asciende desde ese punto hasta los orificios de salida. En esa trayectoria ascendente, una parte del flujo consigue traspasar la barrera física que suponen tanto el deflector como el tranquilizador, pero siempre disminuyendo la velocidad, lo cual confirma el efecto de tranquilización producido por estos elementos. El resto del flujo describe una trayectoria de retorno hacia la parte izquierda del reactor, descendiendo una parte al compartimento inmediatamente inferior y otra rebotando contra el deflector o tranquilizador formando así una especie de trayectoria circunferencial en la zona anóxica.

Además, se han realizado dos comprobaciones locales de la velocidad para validar el modelo.

Primeramente se deseaba comprobar que el funcionamiento de los orificios de salida superiores del reactor es correcto. Para ello, se ha comprobado que existe velocidad de salida por los mismos. El resultado se muestra en la Figura 15 que muestra en abscisas la medida horizontal del reactor y en ordenadas la velocidad en m/s:

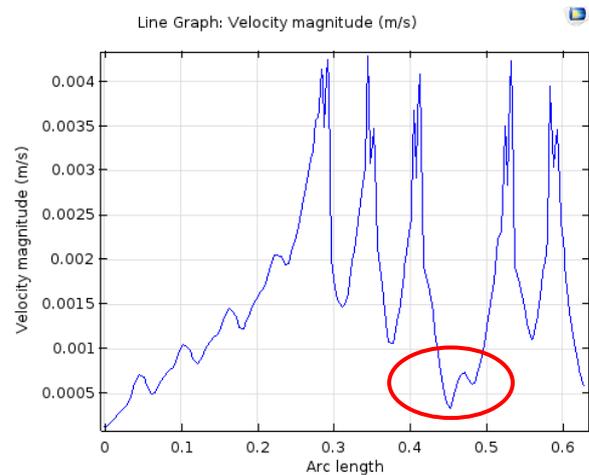


Figura N°15 – Comprobación velocidad de salida

El resultado obtenido ha sido prácticamente el esperado: En los orificios de salida de la parte izquierda del reactor la velocidad es menor debido al flujo descrito anteriormente.

Sin embargo, se ha observado un efecto no previsto: en el tercer orificio (comenzando por la derecha) la velocidad es excesivamente baja para la realmente esperada tal y como se marca en color

rojo. Tras revisar minuciosamente el modelo, no se ha encontrado explicación alguna a dicho fenómeno, por lo que se decide continuar con la modelización teniendo en cuenta dicho posible error.

A continuación, se comprobó que la entrada de caudal funciona correctamente y que la influencia del deflector y el tranquilizador es realista. Para ello se representó otra gráfica espacio-velocidad, en este caso en proyección vertical del reactor. El resultado es el que se muestra en la Figura 16.

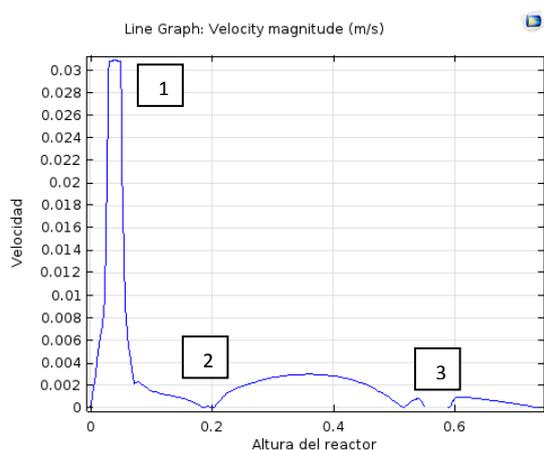


Figura N°16 – Comprobación velocidad de entrada

El resultado obtenido es el esperado:

1. Una velocidad de 0,031 m/s (equivalente a un caudal de 35 L/h para un orificio de entrada de 20 mm) a 4 cm de la base.
2. Disminución de la velocidad hasta el deflector que se encuentra a una altura de 20 cm con el consiguiente aumento instantáneo de velocidad debido a la reducción de sección por las hendiduras.
3. Velocidad altamente variable al paso por el tranquilizador a 55 cm de altura, debido al camino tortuoso que impone el mismo. A continuación, al igual que en el deflector, leve repunte de la velocidad debido a la disminución de sección.

3.2. COMPARACIÓN Y SELECCIÓN DE MÉTODOS Y ALGORITMOS DE RESOLUCIÓN

La introducción de la intermitencia supone un gran problema computacional. Tras realizar numerosas y diferentes simulaciones con el modelo hidrodinámico al completo, se concluye que la incorporación del funcionamiento intermitente del agitador anóxico exige que el paso de cálculo de los algoritmos de resolución sea estrictamente reducido para obtener una solución mediante el método de resolución empleado.

De lo contrario, es decir, para secuencias de cálculo intermedias o libres, el algoritmo es incapaz de resolver el sistema de ecuaciones diferenciales, o cuando lo resuelve, lo hace en secuencias de tiempo demasiado largas. Esto último hace que en la solución no aparezcan los cambios producidos por la intermitencia del agitador, el cual termina funcionando de forma continua para el algoritmo.

Sin embargo, el modo de resolución de secuencias de iteraciones cortas o estrictas, incrementa significativamente el coste computacional, siendo el tiempo necesario para la resolución del sistema de 3 horas y 30 minutos en un equipo con procesador Intel Core i7 3.40 GHz y 8 GB de memoria RAM.

Todo ello produce la necesidad de buscar otro algoritmo de resolución que reduzca el coste computacional y sea más eficiente. Hasta ahora, en el presente trabajo, se ha empleado el BDF (Backward Differentiation Formula), una familia de métodos implícitos para la integración de ecuaciones diferenciales ordinarias. Es un método de pasos múltiples que, para un tiempo y función dados, aproxima la solución en cada momento basándose en la solución inmediatamente anterior, incrementando así la precisión de la aproximación. El BDF es especialmente empleado en la resolución de ecuaciones diferenciales rígidas. Una ecuación diferencial de tipo rígido es aquella que se comporta inestablemente en su resolución mediante ciertos métodos numéricos, por lo que la secuencia de resolución escogida debe ser muy pequeña.

A medida que la capacidad computacional crece, las investigaciones en materia de mecánica de fluidos están prestando más atención a flujos de tipo inestable y no estacionario. En particular, la simulación de la turbulencia exige una gran demanda computacional debido a la necesidad de



integrar una amplia variación de escalas de espacio-temporales en largos periodos de tiempo. Los procesos de altas frecuencias pueden llevar a inestabilidades de tipo no físico si éstas no están controladas por un amortiguamiento de alta frecuencia. Estas frecuencias, si se dejan sin amortiguar, pueden provocar incluso una mayor rigidización del sistema algebraico lineal a resolver, haciendo fallar los métodos iterativos de resolución.

A pesar de que han sido propuestos varios métodos para la integración de las ecuaciones de Navier-Stokes en el tiempo, no hay ninguno que resulte claramente más eficaz que los demás. Muchos son apropiados para un tipo concreto de flujo pero totalmente inexactos para otros. Por ejemplo, los métodos de elementos finitos en espacio-tiempo propuestos por Shakib et al. [18][19] y ampliamente empleados por Tezduyar et al. [15][23], dan una solución con dependencia temporal además de la espacial. Estos métodos dan resultados muy precisos para las ecuaciones de Navier-Stokes, pero su coste computacional solo está justificado en problemas con dominios y condiciones de contorno variables o en movimiento.

En los casos en los que las condiciones de contorno no son móviles o variables, los métodos semi-discretos son más eficaces [1]. Estos métodos discretizan el espacio mediante elementos finitos, dejando como resultado un sistema de ecuaciones diferenciales ordinarias para ser integradas en el tiempo. El especial interés por aplicar estos métodos a la dinámica de fluidos surge por su amplio uso histórico en la dinámica computacional de sólidos y estructuras. Especialmente eficaces e interesantes resultan cuando se tiene un gran número de escalas o frecuencias temporales, como puede ser el caso de la intermitencia del agitador anóxico de AnoxAn-II. Dado que los sistemas de ingeniería son generalmente no lineales, resulta de gran importancia asegurar que existe amortiguación temporal para las frecuencias más allá del grado de resolución elegido. A su vez, es igualmente importante que ese mismo amortiguamiento no afecte a las frecuencias del grado de resolución escogido. Este delicado equilibrio ha llevado a una larga serie de mejoras en los métodos computacionales semi-discretos para la dinámica de sólidos y estructuras, culminando en el desarrollo del método del Alfa Generalizado (*Generalized alpha method*) [2].

Tomando esto como base, Kenneth E. Jansen et al. [14] aplicaron este método a las ecuaciones de Navier-Stokes para flujo laminar y flujo turbulento, donde se pone de manifiesto las ventajas del mismo, especialmente para este último caso.

Teniendo todo lo anterior en cuenta, se ha decidido cambiar y comparar el método de resolución del sistema de ecuaciones diferenciales del BDF a Alfa Generalizado. Gracias a ello, tal y como se preveía, se ha reducido claramente el coste computacional a más de la mitad. El tiempo de iteración en este caso es de 1 hora y 18 minutos con el mismo equipo, empleando secuencias de cálculo intermedias y no estrictas como en el caso de BDF.

En la Figura 17 se muestra la forma de un ciclo de iteración numérica para cada uno de los métodos de resolución aplicados. En la parte superior el método Alfa Generalizado y en la inferior el BDF:

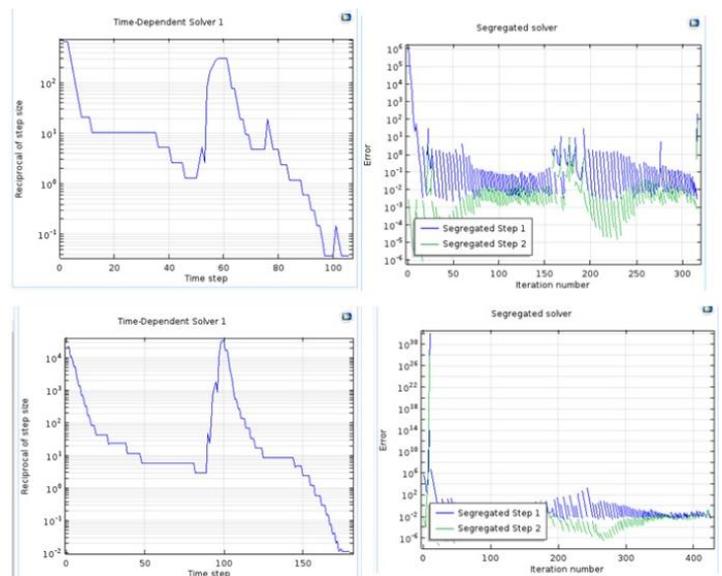


Figura N°17 – Comparativa iteración para diferentes métodos numéricos de resolución

La iteración en el caso del BDF tiene más picos y es más lineal, mientras para que el Alfa Generalizado es algo más paulatina y parabólica. A su vez, tal y como se había adelantado, el ciclo de iteración es más corto y necesita menos número de iteraciones unitarias lo que hace que la convergencia sea más rápida.

En la Figura 18 se muestra una comparativa de los resultados para los dos métodos de resolución en instantes de tiempo significativos: Al comienzo de ciclo ($t = 1$ s), último instante de funcionamiento de

agitador anóxico ($t = 10$ s) y un momento estacionario del reactor ($t = 30$ s).

Se aprecia claramente como los resultados obtenidos son totalmente análogos, por lo que se determina que el empleo del método Alfa Generalizado para la resolución del sistema es correcto y además supone un gran beneficio de coste computacional como ya se ha demostrado.

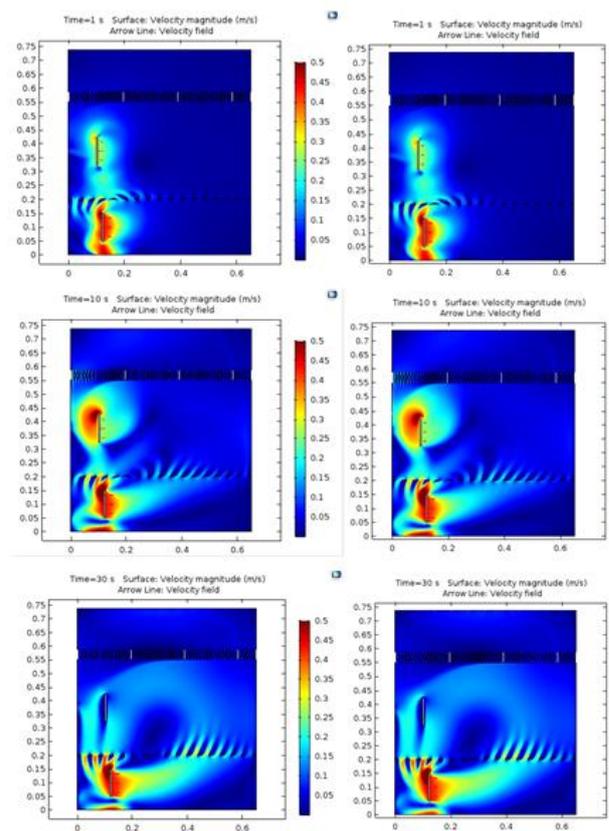


Figura N°18 – Comparativa resultados para diferentes métodos numéricos de resolución

3.3. ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO HIDRODINÁMICO CON AGITACIÓN INTERMITENTE

Con la acción de los agitadores, el comportamiento hidrodinámico observado es el siguiente:

En los primeros 10 segundos ambos agitadores se encuentran en funcionamiento. El campo de velocidades mostrado en la Figura 19 corresponde al primer segundo de funcionamiento.

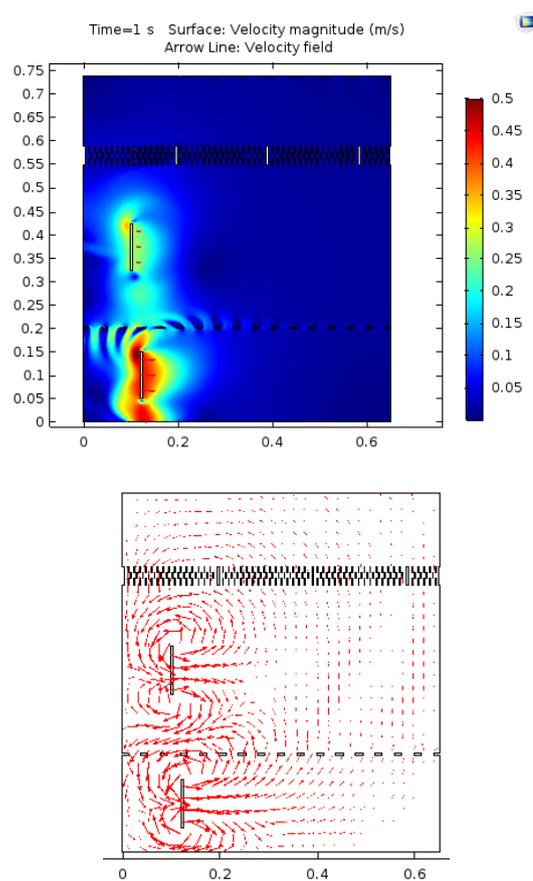


Figura N°19 – Hidrodinámica para $t = 1$ s: Campo y vector de velocidades

Se aprecia primeramente cómo el módulo de la velocidad en los agitadores es correcta: Alrededor de 0,426 m/s en el anaerobio y 0,265 m/s en el anóxico. En ambos, se produce una especie de aceleración o aumento de velocidad en la parte superior de los mismos, manifestado por un color más oscuro que puede ser atribuido al efecto del vértice del agitador que supone un cambio brusco en la trayectoria del flujo.

Por otra parte, ambos agitadores generan una respuesta similar: Succión en la parte posterior e impulsión en la delantera. Lo primero, provoca sendas trayectorias elípticas del flujo y lo segundo, una propulsión hacia la parte derecha del reactor, tal y como ocurría en el reactor sin agitación, describiendo después una trayectoria ascendente. Parte de ese flujo ascendente avanza a través del deflector y tranquilizador y parte queda retenido en su zona correspondiente.

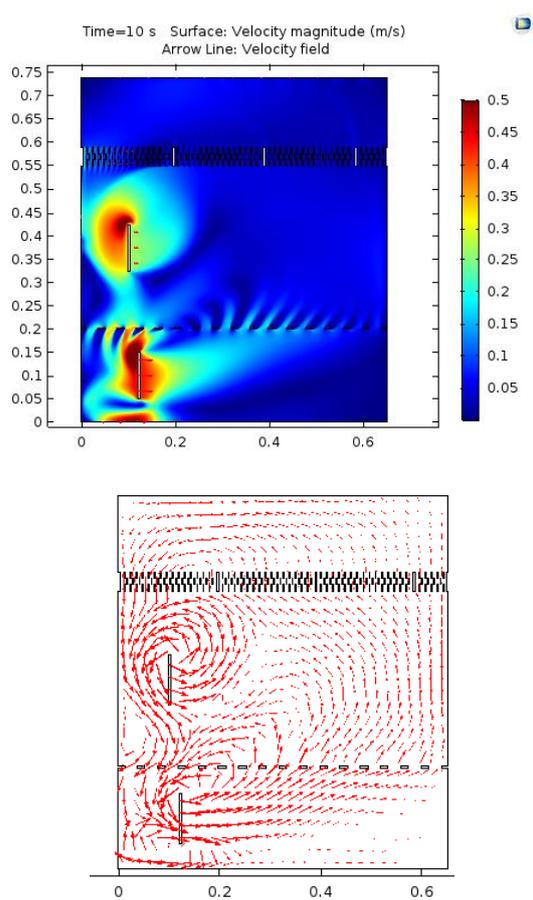


Figura N°20 – Hidrodinámica para $t = 10$ s: Campo y vector de velocidades

Justo en el final del primer ciclo de funcionamiento del agitador anóxico, para $t = 10$ s, la aceleración por vértice en la parte superior de los agitadores se acentúa, como puede observarse en la Figura 20. Es tal este fenómeno, que en el agitador anóxico, prácticamente todo el flujo impulsado es succionado por el mismo agitador, por lo que parece que su función de mezcla solamente se produce en su entorno más inmediato. La aceleración por el vértice superior en el agitador anaerobio, hace que se genere una fuerte succión de la sección inmediatamente superior. Por último, se observa como debajo del agitador anaerobio existe una sección de gran velocidad en sentido izquierdo, ciertamente separada de la parte inferior del mismo: Se trata del vértice succión (similar al superior), pero que se ve aplastado y desplazado hacia abajo (contra el fondo) por el efecto de la corriente de entrada, que se encuentra prácticamente en frente del límite inferior del agitador. En cambio, en la zona anóxica no se observa este efecto porque la recirculación de nitratos entra en el reactor justo a la altura del centro del agitador.

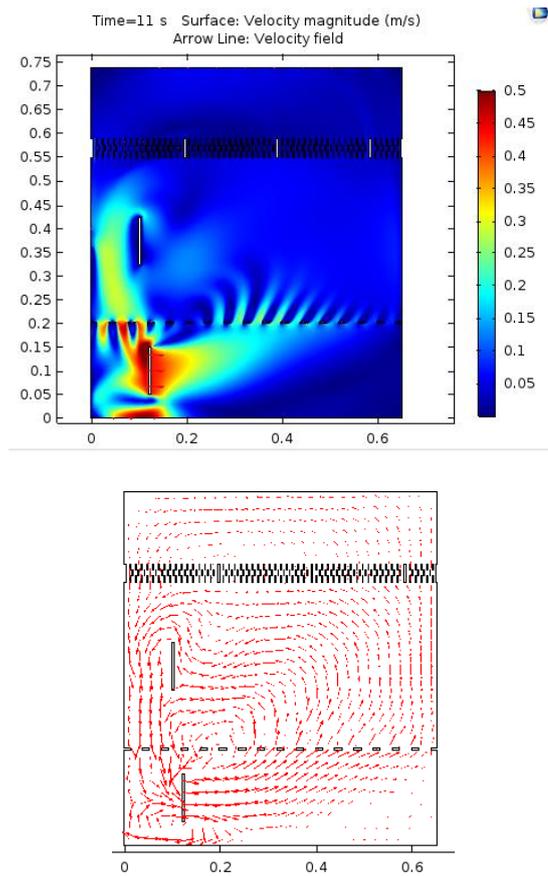
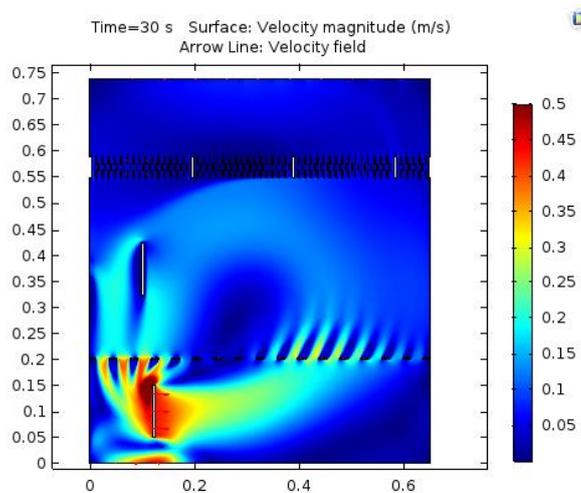


Figura N°21 – Hidrodinámica para $t = 11$ s: Campo y vector de velocidades

Inmediatamente después de la parada del agitador anóxico, $t = 11$ s, sin su funcionamiento, el agitador anaerobio influye sobre toda la sección anóxica a consecuencia de su fuerte succión acentuada por la aceleración por vértice, como puede observarse en la Figura 21.



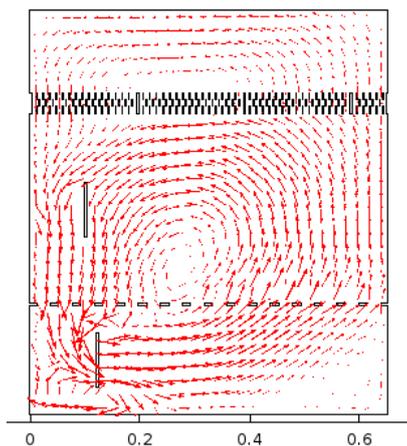


Figura N°22 – Hidrodinámica para $t = 30$ s: Campo y vector de velocidades

Finalmente, se observa que a partir del segundo 30, el reactor llega a un estado hidrodinámico estacionario, el cual se mantendrá 60 segundos hasta el nuevo arranque del agitador anóxico. Este estado estacionario se muestra en la Figura 22. Puede observarse un flujo claramente circunferencial o elíptico que nace en la impulsión del agitador inferior y muere en su succión.

Estos resultados han sido además contrastados con ensayos de trazadores experimentales llevados a cabo en el prototipo piloto de AnoxAn-II. En concreto, se llevó a cabo un ensayo con el agitador anaerobio en marcha y el agitador anóxico parado, en las mismas condiciones de operación que las representadas en el modelo. Se introdujo un flujo continuo de trazador en la entrada de la recirculación de nitratos, y se analizó la evolución de la concentración de trazador en las zonas anaerobia y anóxica. Se observó que la concentración de trazador evolucionó de manera similar en ambas zonas, sugiriendo que no había una adecuada separación hidráulica, hasta el extremo de producirse una mezcla casi completa entre ambas zonas. Se esperaba que la separación hidráulica fuera favorecida al detener el funcionamiento del agitador anóxico, pero el resultado fue el opuesto. Los resultados de las simulaciones corroboran este hecho, permitiendo además entender con más detalle los fenómenos que producen la mezcla.

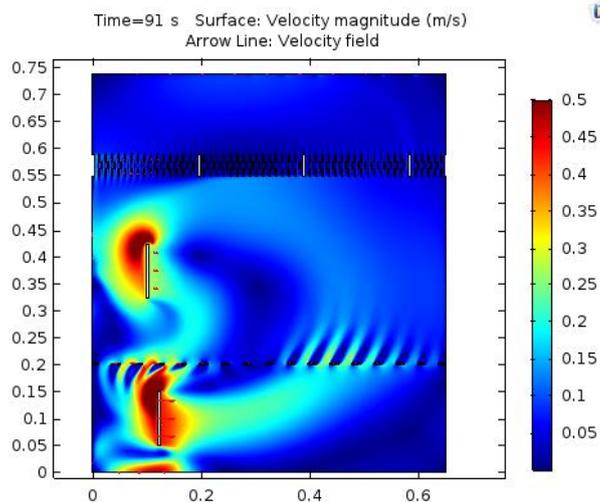


Figura N°23 – Hidrodinámica para $t = 91$ s: Campo y vector de velocidades

Al comienzo del segundo ciclo, con el agitador anóxico ya en marcha, $t = 91$ s, la hidrodinámica es análoga a los primeros diez segundos del proceso, como puede observarse en la Figura 23.

Observando los campos de velocidades mostrados en la Figura 24, se concluye que a causa de que el reactor es capaz de llegar a un estado estacionario durante la parada de uno de los agitadores, los ciclos sucesivos describen el mismo comportamiento que el ya analizado.

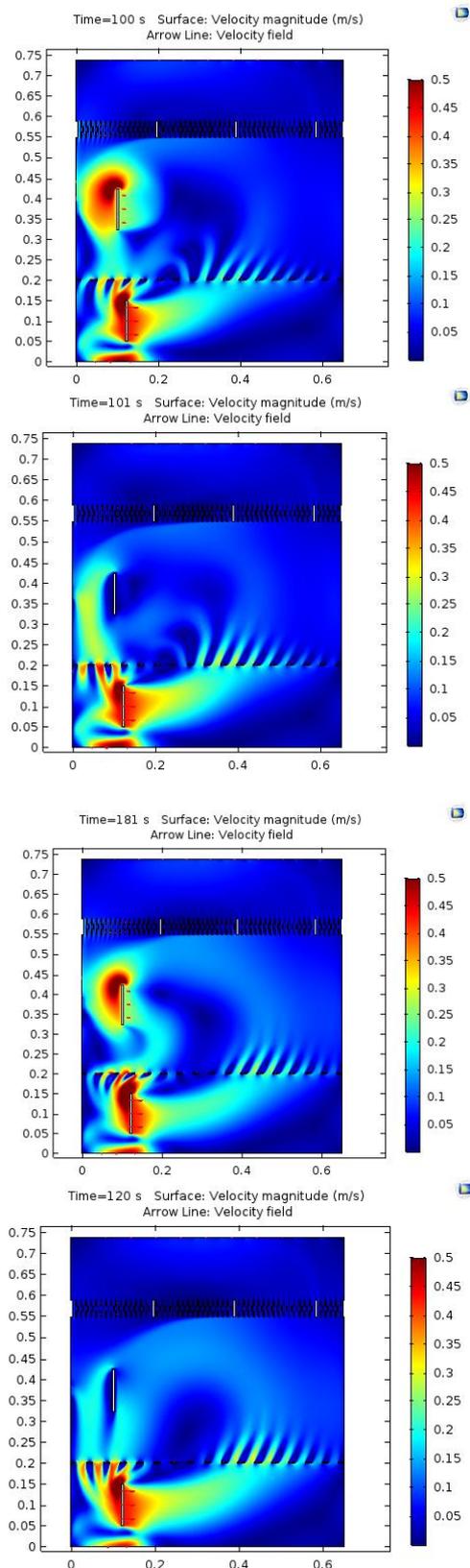


Figura N°24 – Hidrodinámica para $t = 100$ s: Campo y vector de velocidades

3.4. EVALUACIÓN DE LA SEPARACIÓN HIDRÁULICA

A continuación, se procede a analizar la separación hidráulica que provocan el deflector y el tranquilizador. Para analizar la separación hidráulica, se ha realizado el seguimiento de 10 líneas de corriente con distintos orígenes (entrada del afluente, entrada de recirculación de nitratos, impulsión de agitador anaerobio, e impulsión de agitador anóxico) y en los instantes de tiempo ya estudiados ($t = 1, 10, 11$ y 30 s).

En la Figura 25 se muestran los resultados de las líneas de corriente con los cuatro diferentes orígenes para $t = 1$ s, es decir, justo al comienzo del primer ciclo, con los dos agitadores en funcionamiento:

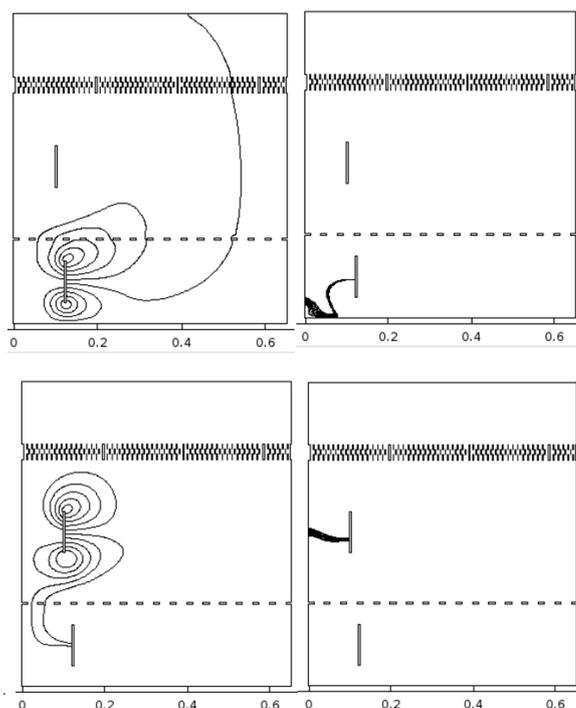


Figura N°25 – Líneas de corriente para $t=1$ s con origen en impulsión de agitador anaerobio (arriba izq.), entrada afluente (arriba dcha.), impulsión de agitador anóxico (abajo izq.) y entrada de recirculación de nitratos (abajo dcha.)

Se observa como para los agitadores en funcionamiento, todas las líneas de corriente que nacen en las entradas, tanto para el afluente como para la recirculación, son succionadas por los agitadores, debido a la gran diferencia de velocidades.

Si se estudian los flujos que se inician en la parte de impulsión de los agitadores, para el anaerobio se

percibe que 2 de las 10 líneas de corriente invaden la zona anóxica y retornan a la succión del agitador anaerobio. Por otra parte, solamente 1 de ellas asciende hasta la zona de clarificación. Para el agitador anóxico, tan solo 2 de las 10 líneas de corriente pasan a la zona anaerobia. La separación hidráulica, para este instante de tiempo, teniendo en cuenta la expresión de S(%) expuesta en la metodología:

$$S(\%) = 100 \cdot (\text{N}^\circ \text{ líneas de corriente} - \text{N}^\circ \text{ líneas de corriente invaden}) / \text{N}^\circ \text{ líneas de corriente}$$

$$S(\%) = 80 \%$$

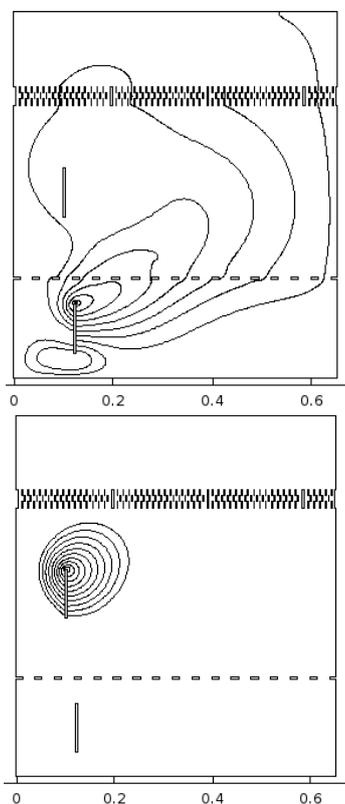


Figura N°26 – Líneas de corriente para t=10 s con origen en impulsión de agitador anaerobio (arriba) e impulsión de agitador anóxico (abajo)

Para t = 10 s, instante final de funcionamiento del agitador anóxico (Figura 26) se observa que de las 10 líneas de corriente que nacen en la impulsión anaerobia, 5 se mantienen en ese compartimento, 3 llegan a la zona anóxica y 2 consiguen desplazarse hasta la zona de clarificación.

Para el agitador anóxico se observa que todas las líneas de corriente se mantienen en el mismo compartimento, con un 100% de separación hidráulica. Sin embargo, el motivo de esta eficacia

no se atribuye a la influencia del BLAS, sino a la gran aceleración por vértice explicada en el apartado anterior.

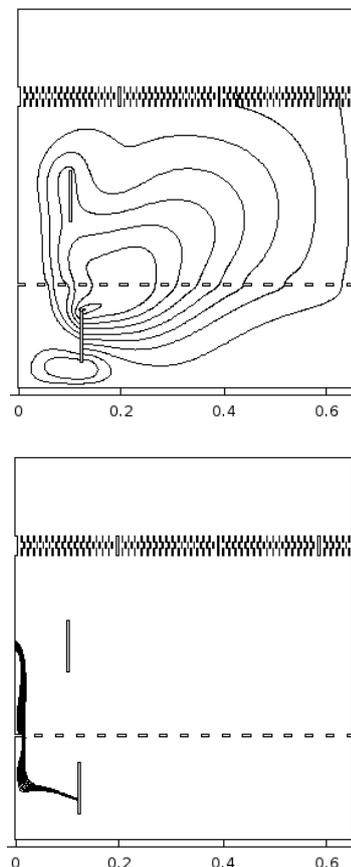


Figura N°27 – Líneas de corriente para t=11 s con origen en impulsión de agitador anaerobio (arriba) y entrada de recirculación de nitratos (abajo)

Para t = 11 s, justo después de la parada del agitador superior (Figura 27), se observa que 7 de las 10 líneas de corriente de la impulsión anaerobia migran hasta la zona anóxica. Ninguna de ellas pasa a la zona de clarificación por la barrera física que supone el BLAS.

En cuanto al agitador anóxico, como éste deja de funcionar, todo el reactor está influenciado por la succión de la zona anaerobia. Las 10 líneas de corriente analizadas con origen en la entrada de recirculación de nitratos se dirigen inmediatamente a la zona de succión del agitador anaerobio, pudiendo establecerse que prácticamente no existe separación hidráulica, lo cual concuerda con el comportamiento hidrodinámico analizado para el mismo instante expuesto en el anterior apartado, así como con los ensayos experimentales realizados en el prototipo.

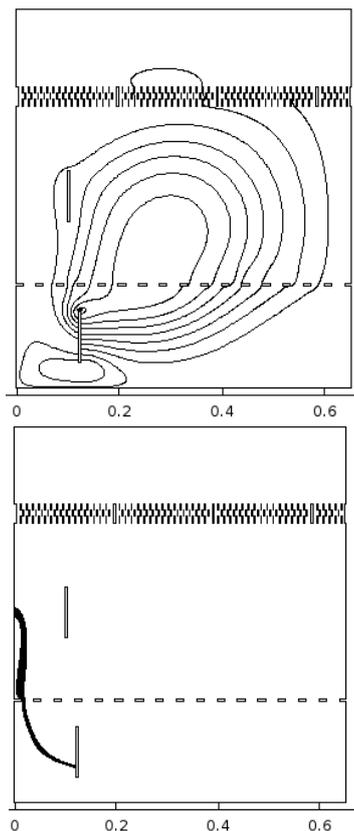


Figura N°28 – Líneas de corriente para $t=30s$ con origen en impulsión de agitador anaerobio (arriba) y entrada de recirculación de nitratos (abajo)

Para $t = 30 s$, momento en el que la hidrodinámica alcanza un estado estacionario (Figura 28), la separación hidráulica entre las líneas nacidas en la zona anóxica vuelve a ser nula debido a la gran succión del agitador anaerobio que influye sobre todo el reactor, como podía esperarse después de los resultados anteriores. La separación hidráulica vuelve a ser despreciable.

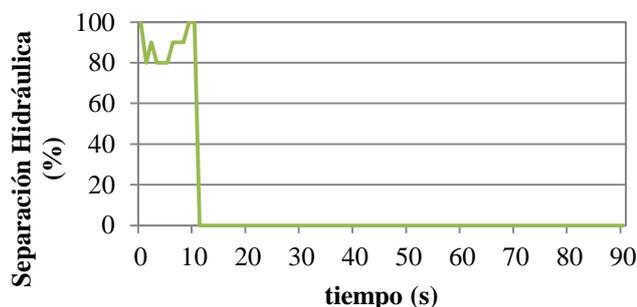


Figura N°29 – % Separación Hidráulica en el tiempo

En la Figura 29 se muestra la evolución del ratio de separación hidráulica en cada instante de tiempo t del ciclo analizado.

De todas las líneas de corriente, tan solo algunas llegan a la zona de clarificación. En la Figura 30 se muestra el porcentaje de las mismas que lo consiguen:

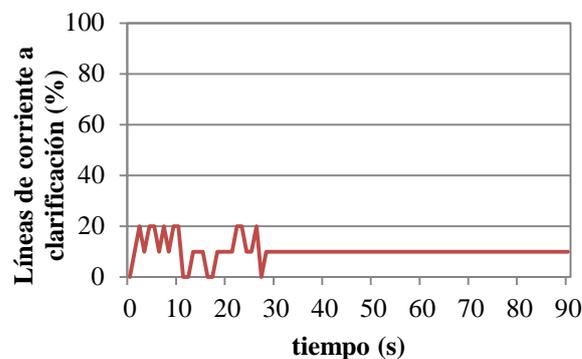


Figura N°30 – % Clarificación en el tiempo

Se concluye que, según los resultados obtenidos, cuando ambos agitadores están en funcionamiento, la separación hidráulica entre ambas zonas es alta, lo cual no inhibe los procesos biológicos necesarios para la depuración del agua residual y cumple los requisitos de partida. Sin embargo, se percibe que esta separación hidráulica, más que por la influencia que debería suponer la barrera física del deflector y del BLAS, se le atribuye, en principio, a la influencia de la succión de ambos agitadores en funcionamiento.

En cambio, cuando el agitador anóxico no se encuentra en funcionamiento, la barrera hidráulica entre las zonas anóxica y anaerobia es aparentemente nula debido a la gran influencia de la succión que genera el compartimento inferior del reactor.

A raíz de los resultados obtenidos, una solución podría ser el funcionamiento continuo del agitador anóxico, algo que sin embargo aumentaría el coste energético del sistema. Por otra parte, un deflector que supusiera una mayor barrera física obtendría mejores resultados de separación hidráulica, pero, por el contrario, impediría en gran medida el ascenso de flujo, y la circulación de los sólidos en suspensión.



3.5. INTRODUCCIÓN DE SÓLIDOS EN SUSPENSIÓN EN EL MODELO

Una vez validados los resultados y analizada la hidrodinámica, el siguiente reto propuesto fue la introducción de los sólidos en suspensión en el sistema. Para ello, en primer lugar se ha seleccionado el modelo de arrastre y mezcla a aplicar.

De todas las existentes, predominan las teorías de Hadamard-Rybczynski (1911) y el de Schiller-Naumann (1935) para partículas esféricas.

Hadamard y Rybczynski dan la velocidad para una burbuja esférica de movimiento lento en un ambiente fluido mediante la siguiente expresión:

$$W_b = \frac{2}{3} \frac{R^2 g (\rho_b - \rho_o)}{\mu_o} \frac{\mu_o + \mu_b}{2\mu_o + 3\mu_b}$$

Siendo:

- R, radio de la partícula
- g, aceleración de la gravedad
- ρ_b , densidad de la partícula
- ρ_o , densidad del fluido
- μ_b , viscosidad de la partícula
- μ_o , viscosidad del fluido

La ecuación de Hadamard-Rybczynski es derivada de las ecuaciones de Navier-Stokes considerando simplemente la fuerza de flotación y fuerza de arrastre actuando sobre la partícula esférica en movimiento, despreciándose la tensión superficial y la fuerza de inercia de la burbuja.

Para poder aplicar este modelo, el número de Reynolds del sistema debe ser inferior a 400 [3], a partir de ahí las fuerzas inerciales no son despreciables. Es por ello que, en el caso del presente trabajo, debe aplicarse el modelo de arrastre de Schiller-Neumann.

El modelo de Schiller-Naumann nace a partir de la ley de arrastre de Stokes, $C_D = 24/Re$ siendo $Re < 1$, que fue extendida a números de Reynolds mayores por medio de un factor de multiplicación adimensional que representa el efecto inercial en la fuerza de arrastre que actúa en una sola partícula esférica [24].

El coeficiente de arrastre para Schiller-Naumann es:

$$\begin{cases} C_D = 24(1+0,15Re^{0,687})/Re & Re \leq 1000 \\ C_D = 0,44 & Re > 1000 \end{cases}$$

En el cual, el número de Reynolds está basado en el diámetro de la partícula dispersa, magnitud de la velocidad relativa (Diferencia entre la velocidad de la fase continua y la dispersa) y densidad y viscosidad de la fase continua [24]:

$$Re = (\rho_c d U_r) / \mu_c$$

Los datos para la fase dispersa empleados serán los siguientes:

- $\rho_d = 1100 \text{ kg/m}^3$
- $d_d = 0,001 \text{ m}$
- % de solidos = 3%

Tras aplicar el modelo de Schiller-Naumann, los resultados no son satisfactorios. A pesar de que el flujo de sólidos es aparentemente correcto, la succión provocada por la condición de contorno de salida de los agitadores hace que éstos se comporten como un sumidero y la fase dispersa desaparezca del sistema, lo cual no representa la realidad. Por lo tanto, la forma en que se han representado los agitadores en el modelo del reactor resulta satisfactoria para el análisis hidrodinámico pero no es válida para la incorporación de una fase dispersa. Se precisa continuar este trabajo para solucionar este problema permitiendo la continuidad de la fase dispersa a través del dominio que representa cada agitador.



4 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

En el presente trabajo se ha modelizado el comportamiento hidrodinámico de un reactor biológico anóxico-anaerobio compacto para la eliminación de nutrientes dentro del marco de la depuración de aguas residuales. Para ello, se ha empleado la Dinámica de Fluidos Computacional (CFD) como herramienta para la simulación.

En cuanto a resolución numérica se refiere, se ha observado que de entre todos los elementos que tiene el reactor, el funcionamiento intermitente del agitador anóxico es el que supone un mayor problema computacional, incrementando notablemente el tiempo necesario para la resolución del sistema de ecuaciones que gobierna el proceso.

Este alto coste computacional es debido al algoritmo de resolución empleado, el BDF, el cual, a pesar de proporcionar resultados muy exactos, exige que los pasos de cálculo o iteraciones sean excesivamente cortas para dar el resultado correcto. De lo contrario, obvia el funcionamiento intermitente del agitador anóxico y lo hace funcionar de forma continua. La solución encontrada es un cambio de algoritmo de resolución a Alfa Generalizado, el cual consigue reducir el tiempo de resolución en más de la mitad obteniendo, además, los mismos resultados.

En cuanto a la hidrodinámica, desde el principio del trabajo se observa como por uno de los diez orificios de salida no fluye agua, comportándose como si estuviese taponado o no estuviese a presión atmosférica. Después de revisar el modelo con cautela, no se encuentra explicación para este fenómeno, pero se concluye que, a pesar de que hay que tenerlo en consideración, parece que no afecta al comportamiento hidrodinámico general del reactor.

Cuando ambos agitadores están en funcionamiento, la separación hidráulica entre las zonas anóxica y anaerobia es alta. Esta separación se debe sobre todo a la alta velocidad de succión que imprime la parte posterior de los agitadores, no dejando avanzar al flujo impulsado por ellos mismos. La influencia del Tranquilizador BLAS y sobre todo del deflector es pequeña, a diferencia de lo que cabía esperar.

Cuando el agitador anóxico deja de funcionar, la fuerte succión que genera el anaerobio influye sobre todo el compartimento superior, introduciendo nitratos en la zona anaerobia e inhibiendo los procesos biológicos para la eliminación de nutrientes. Esta situación de succión es máxima en el intervalo de tiempo que la hidrodinámica de reactor llega a un estado estacionario en el tiempo, es decir, a partir del segundo 30 en cada ciclo.

Por último, se determina que la propuesta de modelización para los agitadores aporta un resultado satisfactorio en la hidrodinámica, pero, por el contrario, supone un sumidero para los sólidos en suspensión, perdiéndolos en el sistema y haciendo necesaria la búsqueda de otra estrategia para la simulación de la fase dispersa.

Futuras líneas de investigación

Una vez comprobado que la metodología para la simulación hidrodinámica es correcta, debe buscarse un modo de que los nitratos no accedan al compartimento anaerobio mediante la variación de tiempo de funcionamiento de los agitadores. Los resultados siempre deberán comprobarse con ensayos experimentales para asegurarse de que el modelo sigue comportándose acorde a la realidad.

Mientras tanto, se debe seguir avanzando en el desarrollo del modelo, resolviendo el problema surgido con los sólidos y, cuando esté resuelto, se podrán introducir ensayos de trazadores en el modelo ya que éstos presentarán el mismo problema de efecto sumidero de los agitadores.

Por último, se debe abrir una línea de trabajo en materia de métodos numéricos. Posiblemente aquí resida la clave para que las simulaciones, además de más rápidas, den resultados totalmente acordes a la realidad, buscando algoritmos que se ajusten exactamente a cada proceso concreto que se desarrolle.

5 REFERENCIAS

- [1] Behr, M.; Hastreiter, D.; Mittal, S.; Tezduyar, T.E. (1996); Incompressible flow past a circular cylinder: dependence of computed flow field on the location of the lateral boundaries. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 123, pp 309-316
- [2] Chung, J.; Hulbert, G.M. (1993); A time integration algorithm for structural dynamics with improved numerical dissipation: The generalized- α method. *Journal of Applied Mechanics*, 60, pp 371-375
- [3] Clift, R.; Grace, J.R.; Weber, M.E. (1978); *Bubbles, Drops and Particles*. Academic Press London. ISBN 012176950X
- [4] Comsol 4.1: CFD Module User's Guide (2010). Comsol Handbook Series
- [5] Diez-Montero, R. (2015); Anoxan: A novel anaerobic-anoxic reactor for biological nutrient removal from wastewater. Tesis Doctoral, Universidad de Cantabria, pp 42-52
- [6] Diez-Montero, R.; De Florio, L.; González-Viar, M.; Volcke, E.I.P.; Tejero, I. (2015); Feasibility of hydraulic separation in a novel anaerobic-anoxic upflow reactor for biological nutrient removal. *Bioprocess Biosyst Eng*, Vol. 38, pp 93-103
- [7] Diez-Montero, R.; De Florio, L.; González-Viar, M.; Herrero, M.; Tejero, I. (2016); Performance evaluation of a novel anaerobic-anoxic sludge blanket reactor for biological nutrient removal treating municipal wastewater. *Bioresource Technology*, Vol. 209, pp 195-204
- [8] Directiva 2000/60/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 23 de octubre de 2000 (DMA)
- [9] Directiva 91/271/CE del Consejo, de 21 de mayo de 1991, sobre el tratamiento de aguas residuales urbanas
- [10] Dussud, J.; Diez-Montero, R.; Tejero, J.I. (2015); Modélisation et optimisation de réacteurs de type AnoxAn avec le logiciel COMSOL. Rapport de Stage Pratique de l'Ingénierie, Escuela Técnica Superior de Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos (Santander).
- [11] *Essentials of Postprocessing and Visualization in COMSOL Multiphysics* (2014). Comsol Handbook Series
- [12] Fernández Oro, J.M. (2012); *Técnicas numéricas en ingeniería de fluidos: Introducción a la dinámica de fluidos computacional (CFD) por el método de volúmenes finitos*. Editorial Reverte. ISBN 9788429126020
- [13] *Introduction to COMSOL Multiphysics 5.1* (2015). Comsol Handbook Series
- [14] Jansen, K.E.; Whiting, C.H.; Hulbert, G.M. (2000); A generalized- α method for integrating the filtered Navier-Stokes equations with a stabilized finite element method. Rensselaer Polytechnic Institute and University of Michigan
- [15] Johnson, A.A.; Tezduyar, T.E (1994); Mesh update strategies in parallel finite element computations of flow problems with moving boundaries and interfaces. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 119, pp 73-94
- [16] Laurent, J.; Samstag, R.W.; Ducoste, J.M.; Griborio, A.; Nopens, I.; Batstone, D.J.; Wicks, J.D., Saunders, S., Potier, O. (2014); A protocol for the use of computational fluid dynamics as supportive tool for wastewater treatment plant modelling. *Water Science and Technology*, 70.10, pp 1575-1584.
- [17] Pryor, R.W. (2012); *Multiphysics modelling using COMSOL 4*. Mercury Learning and Information. ISBN 9781936420094
- [18] Shakib, F.; Hughes, T.J.R. (1991); A new finite element formulation for computational fluid dynamics: IX. Fourier analysis of space-time Galerkin/least-squares algorithms. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 87, pp 35-58
- [19] Shakib, F.; Hughes, T.J.R. (1991); A new finite element formulation for computational fluid dynamics: X. The compressible Euler and Navier-Stokes equations. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 89, pp 141-219
- [20] Tabatabaian, M. (2014); *COMSOL for engineers*. Mercury Learning and Information. ISBN 9781938549533
- [21] Tejero, J.I.; Diez, R.; Esteban, A.L.; Lobo, A.; Temprano, J.; Rodríguez, L. (2010); Reactor biológico anóxico-anaerobio para la eliminación de nutrientes de aguas residuales. Patente Española ES2338979B2
- [22] Tejero, J.I.; Santamaría, C. (1996); Proceso de tratamiento biológico de aguas basado en biopelícula sobre soporte de diseño específico. Patente Española ES2128962B1
- [23] Tezduyar, T.E.; Behr, M.; Liou, J. (1992); New strategy for finite element computations involving moving boundaries and interfaces. The deforming-spatial-domain/space-time procedure. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 94, pp 339-351



[24] Wörner, M. (2003); A compact introduction to the numerical modelling of multiphase flows. Institut für Reaktorsicherheit Programm Nukleare Sicherheitsforschung.

[25] Zabaleta, L.; Diez-Montero, R.; Gonzalez, M.; Tejero, J.I. (2014); Diseño y optimización de un reactor anaerobio-anóxico para la eliminación de nutrientes de aguas residuales aplicable a depuración de mediana y gran escala mediante modelización física. Proyecto Fin de Carrera, Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos (Santander).