



Universidad Politécnica de Cartagena

Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Caminos,  
Canales y Puertos y de Ingeniería de Minas

Grado en Ingeniería Civil

**Estudio con herramientas de  
Dinámica de Fluidos Computacional  
del reactor biológico de la Estación  
Depuradora de Aguas Residuales de  
Roldán, Lo Ferro y Balsicas (Murcia)**

**Dña. Alicia Ros Bernal**

Directores

**Dr. José María Carrillo Sánchez**

**Dr. Juan Tomás García Bermejo**

2020



## **AGRADECIMIENTOS**

*Me gustaría dar las gracias a todas las personas que me han ayudado y me han apoyado durante el desarrollo de este Trabajo Fin de Grado.*

*En primer lugar, al profesor José María Carrillo, por su paciencia e implicación en la elaboración del proyecto, y su gran conocimiento. Por estar siempre disponible, por guiarme y ayudarme a mejorar con sus valiosas sugerencias y correcciones, por todo el tiempo que me ha dedicado y por darme la oportunidad de introducirme en la Dinámica de Fluidos Computacional. Te estaré siempre agradecida.*

*Al profesor Juan García por sus enriquecedoras aportaciones y experiencia en la materia.*

*Al resto de docentes que han contribuido de una forma u otra en mi formación, por la calidad de sus enseñanzas. A la Universidad Politécnica de Cartagena, y en especial a la Escuela de Ingeniería de Caminos, Canales y Puertos e Ingeniería de Minas.*

*A mis amigos, por su comprensión y ánimo, por estar siempre ahí a pesar de mis ausencias estos años.*

*A mis padres, Josefa y José Francisco, y mis hermanos, Francisco y Antonio José, por su apoyo incondicional y por confiar en mí desde el principio. Por anteponer mis intereses y proporcionarme todo lo necesario. Sois fundamentales.*

*A mi abuela María, por su cariño y preocupación y porque sin saber muy bien qué estaba haciendo, ha estado presente en todo momento. A mi abuelo Paco, porque sé que estaría muy orgulloso.*

*Y por último, a Matías, por acompañarme durante el estudio y escuchar mis preocupaciones, por la motivación constante y por hacérmelo todo más fácil.*



---

**ÍNDICE**

|          |   |    |
|----------|---|----|
| 1.       | RESUMEN .....   | 13 |
| 2.       | INTRODUCCIÓN .....  | 14 |
| 3.       | ESTADO DEL ARTE .....                                       | 16 |
| 3.1.     | Estación Depuradora de Aguas Residuales .....               | 16 |
| 3.1.1.   | Línea de agua .....   | 19 |
| 3.1.2.   | Línea de fango.....   | 20 |
| 3.2.     | Fundamentos del tratamiento biológico .....                 | 22 |
| 3.2.1.   | Procesos biológicos .....                                   | 24 |
| 3.2.1.1. | Etapa anaerobia .....                                       | 24 |
| 3.2.1.2. | Etapa anóxica .....   | 26 |
| 3.2.1.3. | Etapa óxica .....   | 27 |
| 3.2.2.   | Cinética de los procesos biológicos .....                   | 29 |
| 3.3.     | Reactor biológico.....                                      | 31 |
| 3.3.1.   | Digestores aerobios de cultivo en suspensión.....           | 32 |
| 3.3.2.   | Digestores aerobios de cultivo fijo .....                   | 36 |
| 3.3.3.   | Digestores anaerobios.....                                  | 38 |
| 3.3.4.   | Digestores para la eliminación de nutrientes .....          | 39 |
| 4.       | DINÁMICA DE FLUIDOS COMPUTACIONAL .....                     | 42 |
| 4.1.     | Estructura de CFD .....                                     | 42 |
| 4.2.     | Ecuaciones que gobiernan la dinámica de fluidos.....        | 44 |
| 4.2.1.   | Ecuación de continuidad o de conservación de la masa .....  | 44 |
| 4.2.2.   | Ecuación de conservación de la cantidad de movimiento ..... | 45 |
| 4.2.3.   | Ecuación de conservación de la energía .....                | 46 |
| 4.3.     | Discretización espacial.....                                | 48 |
| 4.3.1.   | Mallado del dominio fluido .....                            | 48 |
| 4.3.2.   | Métodos de discretización espacial .....                    | 50 |
| 4.3.2.1. | Método de Diferencias Finitas .....                         | 51 |

|            |   |    |
|------------|---|----|
| 4.3.2.1.1. | Error de truncamiento .....   | 52 |
| 4.3.2.1.2. | Condiciones de frontera .....   | 53 |
| 4.4.       | Discretización temporal .....   | 53 |
| 4.4.1.     | Clasificación de esquemas numéricos .....                               | 54 |
| 4.5.       | Modelación de la turbulencia .....                                      | 55 |
| 4.5.1.     | Introducción .....  | 55 |
| 4.5.2.     | Cascada de energía de Kolmogorov .....                                  | 57 |
| 4.5.3.     | Modelos numéricos de simulación de flujos turbulentos .....             | 58 |
| 4.5.3.1.   | Modelo de dos ecuaciones: k-épsilon .....                               | 60 |
| 4.5.3.2.   | Modelo de dos ecuaciones: RNG k- $\epsilon$ .....                       | 61 |
| 4.5.3.3.   | Modelo de dos ecuaciones: k-omega .....                                 | 62 |
| 4.5.3.4.   | Modelo de dos ecuaciones: Shear Stress Transport (SST) .....            | 63 |
| 4.5.3.5.   | Modelo de Esfuerzos Cortantes de Reynolds (RSM) .....                   | 64 |
| 4.6.       | Aportaciones de la dinámica de fluidos computacional en las EDARs ..... | 65 |
| 5.         | MODELO NUMÉRICO FLOW-3D .....   | 69 |
| 5.1.       | Ventajas y desventajas del modelado con FLOW-3D .....                   | 69 |
| 5.2.       | Mallado en FLOW-3D .....  | 70 |
| 5.3.       | Algoritmo FAVOR .....   | 71 |
| 5.4.       | Modelización de la superficie libre (método VOF) .....                  | 72 |
| 5.4.1.     | Ecuación del flujo en lámina libre (VOF) .....                          | 73 |
| 5.4.2.     | Aproximaciones de advección de la interfaz fluida .....                 | 74 |
| 5.5.       | Condiciones de contorno .....   | 74 |
| 6.         | ESTUDIO DE APLICACIÓN .....   | 76 |
| 6.1.       | Introducción .....  | 76 |
| 6.2.       | Modelo numérico .....   | 77 |
| 6.2.1.     | Fluidos .....   | 77 |
| 6.2.2.     | Geometría y mallado .....   | 77 |
| 6.2.3.     | Condiciones de contorno e iniciales .....                               | 79 |
| 6.2.4.     | Sondas .....  | 80 |

|        |   |     |
|--------|---|-----|
| 6.2.5. | Modelos activados.....  | 81  |
| 6.2.1. | Métodos numéricos seleccionados .....                             | 82  |
| 7.     | RESULTADOS.....   | 83  |
| 7.1.   | Análisis de resultados a la salida de la cámara anaerobia.....    | 84  |
| 7.1.1. | Tiempo de retención hidráulico .....                              | 84  |
| 7.1.2. | Velocidad del fluido .....  | 87  |
| 7.1.3. | Distancia recorrida por el fluido .....                           | 92  |
| 7.2.   | Análisis de resultados en el interior de la cámara anaerobia..... | 95  |
| 7.2.1. | Tiempo de retención hidráulico .....                              | 95  |
| 7.2.2. | Velocidad del fluido .....  | 109 |
| 7.2.3. | Distancia recorrida por el fluido .....                           | 121 |
| 8.     | CONCLUSIONES .....  | 133 |
| 9.     | FUTUROS DESARROLLOS.....  | 134 |
| 10.    | BIBLIOGRAFÍA.....   | 135 |

**ÍNDICE DE FIGURAS**

|  |    |
|--|----|
| Figura 1. Diagrama de procesos. Línea de agua y línea de fango de una estación depuradora (EPSAR, 2018).   | 19 |
| Figura 2. Esquema de los procesos metabólicos de oxidación/reducción (Obtenido de Pedreño, 2014).  | 23 |
| Figura 3. Esquema de eliminación biológica de fósforo (Venegas, 2015).   | 25 |
| Figura 4. Modelo bioquímico simplificado de las bacterias acumuladoras de fósforo (Venegas, 2015).   | 27 |
| Figura 5. Esquema de eliminación biológica de nitrógeno (Venegas, 2015).   | 28 |
| Figura 6. Reactor de lodos activos tipo pistón (Asano et al., 2007).   | 33 |
| Figura 7. Reactor de mezcla completa (Asano et al., 2007).   | 33 |
| Figura 8. Digestor con alimentación escalonada (Srinivas, 2008).   | 34 |
| Figura 9. Digestor de aireación proporcional (Srinivas, 2008).   | 34 |
| Figura 10. Canal de oxidación (Asano et al., 2007).  | 36 |
| Figura 11. Esquema de un filtro percolador (Adaptado desde Romero, 2000).  | 37 |
| Figura 12. Filtro de lecho móvil (Zalakain, 2010).   | 38 |
| Figura 13. Reactor de manto de lodos de flujo ascendente (Srinivas, 2008).   | 39 |
| Figura 14. Configuración de los sistemas de procesos biológicos (Alasino, 2009).   | 41 |
| Figura 15. Etapas del planteamiento de un problema CFD (Tu et al., 2018).  | 43 |
| Figura 16. Ejemplo de celda con un espaciado $\Delta x$ e $\Delta y$ , así como un ángulo $\theta$ entre las líneas que definen la cuadrícula (Tu et al., 2018). | 49 |
| Figura 17. Fluctuación de la velocidad respecto al tiempo en un punto de un flujo turbulento (Tu et al., 2018).  | 57 |
| Figura 18. Estudios publicados sobre CFD (Chiva et al., 2018).   | 65 |
| Figura 19. Ubicación de las variables en una celda de malla (FLOW Science Inc., 2016)  | 71 |
| Figura 20. Sólido a modelar (izquierda) y sólido interpretado por el método FAVOR (derecha) (FLOW Science Inc., 2016).   | 72 |
| Figura 21. Representación del método VOF (FLOW Science Inc., 2015).  | 73 |
| Figura 22. Sistema de depuración Roldán, Lo Ferro y Balsicas (Esamur, 2018).   | 76 |
| Figura 23. Geometría del reactor: vista 3D (izquierda) y vista frontal (derecha).  | 78 |



|  |    |
|--|----|
| Figura 24. Vistas de la malla generada para definir el dominio fluido .....  | 78 |
| Figura 25. Mallado del modelo 3D (izquierda) y renderizado FAVOR (derecha).....  | 79 |
| Figura 26. Condiciones de contorno de la malla .....   | 80 |
| Figura 27. Ubicación de las sondas .....   | 81 |
| Figura 28. Tiempo de retención hidráulico medido en las sondas ubicadas en los orificios de salida en función del tamaño de la malla y del modelo de turbulencia .....   | 84 |
| Figura 29. Error relativo del tiempo de retención hidráulico, entre los distintos tamaños de malla, medida en las sondas ubicadas en los orificios de salida .....   | 85 |
| Figura 30. Tiempo de retención hidráulico para un plano horizontal a nivel de los orificios de salida (0.1 m sobre la solera) con un tamaño de malla de 0.4 m: (a) modelo laminar, (b) modelo k- $\epsilon$ , (c) modelo RNG k- $\epsilon$ .....   | 87 |
| Figura 31. Velocidad del fluido medida en las sondas ubicadas en los orificios de salida en función del tamaño de la malla y del modelo de turbulencia .....   | 88 |
| Figura 32. Error relativo de la velocidad total, entre los distintos tamaños de malla, medida en las sondas ubicadas en los orificios de salida .....  | 88 |
| Figura 33. Velocidad en un plano horizontal a nivel de los orificios de salida (0.1 m sobre la solera) para un tamaño de malla de 0.4 m: (a) modelo laminar, (b) modelo k- $\epsilon$ , (c) modelo RNG k- $\epsilon$ .....                         | 90 |
| Figura 34. Vectores de velocidad en un plano horizontal a nivel de los orificios de salida (0.1 m sobre la solera) para un tamaño de malla de 0.4 m: (a) modelo laminar, (b) modelo k- $\epsilon$ , (c) modelo RNG k- $\epsilon$ .....             | 91 |
| Figura 35. Distancia recorrida por el fluido registrada en las sondas ubicadas en los orificios de salida en función del tamaño de la malla y del modelo de turbulencia .....  | 92 |
| Figura 36. Error relativo de la distancia recorrida por el fluido, entre los distintos tamaños de malla, medida en las sondas ubicadas en los orificios de salida .....  | 93 |
| Figura 37. Distancia recorrida por el fluido en un plano horizontal a nivel de los orificios de salida (0.1 m sobre la solera) para un tamaño de malla de 0.4 m: (a) modelo laminar, (b) modelo k- $\epsilon$ , (c) modelo RNG k- $\epsilon$ ..... | 94 |
| Figura 38. Ubicación de las sondas empleadas para el análisis del interior de la cámara .....  | 95 |
| Figura 39. Tiempo de retención hidráulico en las sondas Anaerobio 2A a distintas alturas según el modelo de turbulencia y el tamaño de malla .....   | 96 |
| Figura 40. Error relativo del tiempo de retención hidráulico entre los distintos tamaños de malla en las sondas Anaerobio 2A .....   | 97 |

|  |     |
|--|-----|
| Figura 41. Tiempo de retención hidráulico en las sondas Anaerobio 2B a distintas alturas según el modelo de turbulencia y el tamaño de malla .....   | 99  |
| Figura 42. Error relativo del tiempo de retención hidráulico entre los distintos tamaños de malla en las sondas Anaerobio 2B .....   | 101 |
| Figura 43. Tiempo de retención hidráulico en las sondas Anaerobio 2C a distintas alturas según el modelo de turbulencia y el tamaño de malla .....   | 103 |
| Figura 44. Error relativo del tiempo de retención hidráulico entre los distintos tamaños de malla en las sondas Anaerobio 2C .....   | 104 |
| Figura 45. Tiempo de retención hidráulico en un plano horizontal intermedio entre las salidas y la entrada (1.5 m sobre la solera) para un tamaño de malla de 0.4 m: (a) modelo laminar, (b) modelo k- $\epsilon$ y (c) modelo RNG k- $\epsilon$ ..... | 106 |
| Figura 46. Tiempo de retención hidráulico en un plano horizontal a nivel de la entrada (2.8 m sobre la solera) para un tamaño de malla de 0.4 m: (a) modelo laminar, (b) modelo k- $\epsilon$ y (c) modelo RNG k- $\epsilon$ .....                     | 107 |
| Figura 47. Tiempo de retención hidráulico en un plano horizontal entre la entrada y la superficie libre (3.5 m sobre la solera) para un tamaño de malla de 0.4 m: (a) modelo laminar, (b) modelo k- $\epsilon$ y (c) modelo RNG k- $\epsilon$ .....    | 107 |
| Figura 48. Tiempo de retención hidráulico en un plano longitudinal a 2.5 m de la pared exterior para un tamaño de malla de 0.4 m: (a) modelo laminar, (b) modelo k- $\epsilon$ y (c) modelo RNG k- $\epsilon$ .....                                    | 108 |
| Figura 49. Tiempo de retención hidráulico en un plano longitudinal a mitad de la cámara para un tamaño de malla de 0.4 m: (a) modelo laminar, (b) modelo k- $\epsilon$ y (c) modelo RNG k- $\epsilon$ .....  | 108 |
| Figura 50. Tiempo de retención hidráulico en un plano longitudinal a 2.5 m de la pared interior para un tamaño de malla de 0.4 m: (a) modelo laminar, (b) modelo k- $\epsilon$ y (c) modelo RNG k- $\epsilon$ .....                                    | 108 |
| Figura 51. Velocidad en las sondas Anaerobio 2A a distintas alturas según el modelo de turbulencia y el tamaño de malla .....  | 109 |
| Figura 52. Error relativo de la velocidad entre los distintos tamaños de malla en las sondas Anaerobio 2A .....  | 110 |
| Figura 53. Velocidad en las sondas Anaerobio 2B a distintas alturas según el modelo de turbulencia y el tamaño de malla .....  | 112 |
| Figura 54. Error relativo de la velocidad entre los distintos tamaños de malla en las sondas Anaerobio 2B .....  | 113 |
| Figura 55. Velocidad total en las sondas Anaerobio 2C a distintas alturas según el modelo de turbulencia y el tamaño de malla .....  | 115 |

|   |     |
|---|-----|
| Figura 56. Error relativo de la velocidad entre los distintos tamaños de malla en las sondas Anaerobio 2C .....   | 116 |
| Figura 57. Velocidad en un plano horizontal intermedio entre las salidas y la entrada (1.5 m sobre la solera) para un tamaño de malla de 0.4 m: (a) modelo laminar, (b) modelo k- $\epsilon$ y (c) modelo RNG k- $\epsilon$ .....                         | 118 |
| Figura 58. Velocidad en un plano horizontal a nivel de la entrada (2.8 m sobre la solera) para un tamaño de malla de 0.4 m: (a) modelo laminar, (b) modelo k- $\epsilon$ y (c) modelo RNG k- $\epsilon$ .....   | 119 |
| Figura 59. Velocidad en un plano horizontal entre la entrada y la superficie libre (3.5 m sobre la solera) para un tamaño de malla de 0.4 m: (a) modelo laminar, (b) modelo k- $\epsilon$ y (c) modelo RNG k- $\epsilon$ .....                            | 119 |
| Figura 60. Velocidad en un plano longitudinal a 2.5 m de la pared exterior para un tamaño de malla de 0.4 m: (a) modelo laminar, (b) modelo k- $\epsilon$ y (c) modelo RNG k- $\epsilon$ .....  | 120 |
| Figura 61. Velocidad en un plano longitudinal a mitad de la cámara para un tamaño de malla de 0.4 m: (a) modelo laminar, (b) modelo k- $\epsilon$ y (c) modelo RNG k- $\epsilon$ .....  | 120 |
| Figura 62. Velocidad en un plano longitudinal a 2.5 m de la pared interior para un tamaño de malla de 0.4 m: (a) modelo laminar, (b) modelo k- $\epsilon$ y (c) modelo RNG k- $\epsilon$ .....  | 120 |
| Figura 63. Distancia recorrida por el fluido medida en las sondas Anaerobio 2A a distintas alturas según el modelo de turbulencia y el tamaño de malla .....  | 121 |
| Figura 64. Error relativo de la distancia recorrida por el fluido entre los distintos tamaños de malla en las sondas Anaerobio 2A .....   | 122 |
| Figura 65. Distancia recorrida por el fluido medida en las sondas Anaerobio 2B a distintas alturas según el modelo de turbulencia y el tamaño de malla .....  | 124 |
| Figura 66. Error relativo de la distancia recorrida por el fluido entre los distintos tamaños de malla en las sondas Anaerobio 2B.....  | 125 |
| Figura 67. Distancia recorrida por el fluido medida en las sondas Anaerobio 2C a distintas alturas según el modelo de turbulencia y el tamaño de malla .....  | 127 |
| Figura 68. Error relativo de la distancia recorrida por el fluido entre los distintos tamaños de malla en las sondas Anaerobio 2C.....  | 128 |
| Figura 69. Distancia recorrida por el fluido en un plano horizontal intermedio entre las salidas y la entrada (1.5 m sobre la solera) para un tamaño de malla de 0.4 m: (a) modelo laminar, (b) modelo k- $\epsilon$ y (c) modelo RNG k- $\epsilon$ ..... | 130 |

Figura 70. Distancia recorrida por el fluido en un plano horizontal a nivel de la entrada (2.8 m sobre la solera) para un tamaño de malla de 0.4 m: (a) modelo laminar, (b) modelo k- $\epsilon$  y (c) modelo RNG k- $\epsilon$ ..... 131

Figura 71. Distancia recorrida por el fluido en un plano horizontal entre la entrada y la superficie libre (3.5 m sobre la solera) para un tamaño de malla de 0.4 m: (a) modelo laminar, (b) modelo k- $\epsilon$  y (c) modelo RNG k- $\epsilon$  ..... 131

Figura 72. Distancia recorrida por el fluido en un plano longitudinal a 2.5 m de la pared exterior para un tamaño de malla de 0.4 m: (a) modelo laminar, (b) modelo k- $\epsilon$  y (c) modelo RNG k- $\epsilon$ ..... 132

Figura 73. Distancia recorrida por el fluido en un plano longitudinal a mitad de la cámara para un tamaño de malla de 0.4 m: (a) modelo laminar, (b) modelo k- $\epsilon$  y (c) modelo RNG k- $\epsilon$ ..... 132

Figura 74. Distancia recorrida por el fluido en un plano longitudinal a 2.5 m de la pared interior para un tamaño de malla de 0.4 m: (a) modelo laminar, (b) modelo k- $\epsilon$  y (c) modelo RNG k- $\epsilon$ ..... 132

**ÍNDICE DE TABLAS**

Tabla 1. Requisitos de depuración exigibles a las ARUs según la zona receptora. (Directiva 91/271/CEE)..... 17

Tabla 2. Biodegradabilidad del agua residual urbana según la relación DBO5/DQO (Metcalf & Eddy, 2000). ..... 23

Tabla 3. Decantabilidad de un fango activado de acuerdo con su IVF (Wanner, 1997). 29

Tabla 4. Índice de convergencia de la malla para el tiempo de retención hidráulico según un modelo laminar ..... 85

Tabla 5. Índice de convergencia de la malla para el tiempo de retención hidráulico según un modelo de turbulencia k-ε ..... 86

Tabla 6. Índice de convergencia de la malla para el tiempo de retención hidráulico según un modelo de turbulencia RNG k-ε ..... 86

Tabla 7. Índice de convergencia de la malla para la velocidad según un modelo laminar ..... 89

Tabla 8. Índice de convergencia de la malla para la velocidad según un modelo de turbulencia k-ε ..... 89

Tabla 9. Índice de convergencia de la malla para la velocidad según un modelo de turbulencia RNG k-ε ..... 90

Tabla 10. Índice de convergencia de la malla para la distancia recorrida por el fluido según un modelo laminar ..... 93

Tabla 11. Índice de convergencia de la malla para la distancia recorrida por el fluido según un modelo de turbulencia k-ε ..... 93

Tabla 12. Índice de convergencia de la malla para la distancia recorrida por el fluido según un modelo de turbulencia RNG k-ε ..... 94

Tabla 13. Índice de convergencia de la malla para el tiempo de retención hidráulico en las sondas Anaerobio 2A según un modelo laminar ..... 98

Tabla 14. Índice de convergencia de la malla para el tiempo de retención hidráulico en las sondas Anaerobio 2A según un modelo k-ε..... 99

Tabla 15. Índice de convergencia de la malla para el tiempo de retención hidráulico en las sondas Anaerobio 2A según un modelo RNG k-ε..... 99

Tabla 16. Índice de convergencia de la malla para el tiempo de retención hidráulico en las sondas Anaerobio 2B según un modelo laminar ..... 102

|   |     |
|---|-----|
| Tabla 17. Índice de convergencia de la malla para el tiempo de retención hidráulico en las sondas Anaerobio 2B según un modelo k- $\epsilon$ .....        | 102 |
| Tabla 18. Índice de convergencia de la malla para el tiempo de retención hidráulico en las sondas Anaerobio 2B según un modelo RNG k- $\epsilon$ .....    | 102 |
| Tabla 19. Índice de convergencia de la malla para el tiempo de retención hidráulico en las sondas Anaerobio 2C según un modelo laminar .....              | 105 |
| Tabla 20. Índice de convergencia de la malla para el tiempo de retención hidráulico en las sondas Anaerobio 2C según un modelo k- $\epsilon$ .....        | 105 |
| Tabla 21. Índice de convergencia de la malla para el tiempo de retención hidráulico en las sondas Anaerobio 2C según un modelo RNG k- $\epsilon$ .....    | 105 |
| Tabla 22. Índice de convergencia de la malla para la velocidad en las sondas Anaerobio 2A según un modelo laminar.....                                    | 111 |
| Tabla 23. Índice de convergencia de la malla para la velocidad en las sondas Anaerobio 2A según un modelo k- $\epsilon$ .....                             | 111 |
| Tabla 24. Índice de convergencia de la malla para la velocidad en las sondas Anaerobio 2A según un modelo RNG k- $\epsilon$ .....                         | 112 |
| Tabla 25. Índice de convergencia de la malla para la velocidad en las sondas Anaerobio 2B según un modelo laminar .....                                   | 114 |
| Tabla 26. Índice de convergencia de la malla para la velocidad en las sondas Anaerobio 2B según un modelo k- $\epsilon$ .....                             | 114 |
| Tabla 27. Índice de convergencia de la malla para la velocidad en las sondas Anaerobio 2B según un modelo RNG k- $\epsilon$ .....                         | 115 |
| Tabla 28. Índice de convergencia de la malla para la velocidad en las sondas Anaerobio 2C según un modelo laminar .....                                   | 117 |
| Tabla 29. Índice de convergencia de la malla para la velocidad en las sondas Anaerobio 2C según un modelo k- $\epsilon$ .....                             | 117 |
| Tabla 30. Índice de convergencia de la malla para la velocidad en las sondas Anaerobio 2C según un modelo RNG k- $\epsilon$ .....                         | 118 |
| Tabla 31. Índice de convergencia de la malla para la distancia recorrida por el fluido en las sondas Anaerobio 2A según un modelo laminar .....           | 123 |
| Tabla 32. Índice de convergencia de la malla para la distancia recorrida por el fluido en las sondas Anaerobio 2A según un modelo k- $\epsilon$ .....     | 123 |
| Tabla 33. Índice de convergencia de la malla para la distancia recorrida por el fluido en las sondas Anaerobio 2A según un modelo RNG k- $\epsilon$ ..... | 123 |

Tabla 34. Índice de convergencia de la malla para la distancia recorrida por el fluido en las sondas Anaerobio 2B según un modelo laminar ..... 126

Tabla 35. Índice de convergencia de la malla para la distancia recorrida por el fluido en las sondas Anaerobio 2B según un modelo  $k-\epsilon$  ..... 126

Tabla 36. Índice de convergencia de la malla para la distancia recorrida por el fluido en las sondas Anaerobio 2B según un modelo RNG  $k-\epsilon$  ..... 126

Tabla 37. Índice de convergencia de la malla para la distancia recorrida por el fluido en las sondas Anaerobio 2C según un modelo laminar ..... 129

Tabla 38. Índice de convergencia de la malla para la distancia recorrida por el fluido en las sondas Anaerobio 2C según un modelo  $k-\epsilon$  ..... 129

Tabla 39. Índice de convergencia de la malla para la distancia recorrida por el fluido en las sondas Anaerobio 2C según un modelo RNG  $k-\epsilon$  ..... 130





## 1. RESUMEN

---

La Dinámica de Fluidos Computacional (CFD) permite obtener una visión más profunda de los procesos de depuración. Los trabajos acometidos hasta ahora evidencian la influencia de la geometría de los reactores biológicos en el patrón de flujo, motivo por el cual la modelación hidrodinámica ha ganado relevancia en la optimización de diseños.

Para el dimensionamiento de estas unidades, tradicionalmente se ha atendido a parámetros de entrada, tratando de determinar el tiempo de retención hidráulico (TRH) con el que se consiguen los niveles de reducción previstos. Esto parte de la hipótesis de que se produce una tasa de renovación homogénea del fluido y a pesar de que este procedimiento es empleado en la selección del volumen del reactor, presenta grandes deficiencias al no contemplar el comportamiento hidráulico real, razón por la cual, no se logran los rendimientos esperados en multitud de ocasiones, poniéndose de manifiesto el interés que suscita el análisis hidráulico.

Es por ello que el presente estudio tiene por finalidad evaluar el comportamiento hidrodinámico, para el caudal de diseño, de un reactor biológico tipo A2O perteneciente a la Estación Depuradora de Aguas Residuales de Roldán, Lo Ferro y Balsicas, en el T.M. de Torre Pacheco (Murcia). Para ello, se ha empleado el software FLOW-3D con el que se ha analizado el funcionamiento de la cámara anaerobia para un caudal de entrada de  $0.032 \text{ m}^3/\text{s}$ .

En el modelo numérico tridimensional a escala real elaborado en FLOW-3D se han implementado los modelos de turbulencia  $k-\varepsilon$  y RNG  $k-\varepsilon$ . El régimen laminar también ha sido analizado. Asimismo, se han considerado distintos tamaños de malla a fin de determinar la influencia del modelo de turbulencia y la sensibilidad del modelo frente al tamaño de malla.

El estudio incluye un análisis del tiempo de retención hidráulico, la velocidad y la distancia recorrida por el fluido tanto a la salida de la cámara como en el interior de la misma. Se ha calculado el error relativo de los resultados obtenidos con los tamaños de malla más gruesos respecto a los proporcionados por la malla más fina y se ha evaluado el índice de convergencia de la malla (Grid Convergence Index, GCI) propuesto por Roache (1994). Estos aspectos han sido tenidos en cuenta para seleccionar el modelo de turbulencia y el tamaño de malla más recomendado en este estudio.

## 2. INTRODUCCIÓN

---

El tratamiento de las aguas residuales supone un requisito indispensable dado el incremento de la actividad humana e industrial en países desarrollados. La importancia de la protección de la calidad de las aguas continentales y marítimas de los efectos negativos de los vertidos, pone de manifiesto la necesidad de estudio del funcionamiento de estas plantas, a fin de garantizar una adecuación del agua residual previa a su vertido al medio natural.

El agua residual resultante de la actividad humana o industrial discurre por la red de saneamiento para ser conducida hasta una estación depuradora de aguas residuales, donde experimenta una serie de procesos fisicoquímicos y biológicos, reduciendo su contaminación para asimilar la calidad de las aguas a la exigida por la legislación que autoriza su vertido al medio receptor.

Las cada vez más estrictas restricciones ambientales han propiciado la evolución de la configuración de las plantas de tratamiento, que presentan una creciente complejidad, debiendo prestar una mayor flexibilidad ante variaciones de carga de las aguas residuales, mínima producción de fangos y efluentes más respetuosos con el medio ambiente.

El tratamiento biológico convencional de fangos activos, ha evolucionado hasta dar paso a la combinación de los procesos de nitrificación/desnitrificación con los procesos biológicos de eliminación de fósforo. Estos procesos biológicos pretenden reproducir los procesos de autodepuración que tienen lugar, de forma natural, en los cauces de agua. La presencia de microorganismos, capaces de descomponer los desechos, metabolizándolos y transformándolos en sustancias simples bajo condiciones óptimas, posibilitan la aceleración de los procesos naturales.

La necesidad de no atender únicamente a aspectos químicos o biológicos para el dimensionamiento de estas instalaciones, asociada a la dificultad de hallar soluciones analíticas, fácilmente intuitivas, de las ecuaciones que gobiernan el fluido, ha favorecido un aumento notable en el uso de CFD (Computational Fluid Dynamics ó Dinámica de Fluidos Computacional) en este campo.

La Dinámica de Fluidos Computacional (CFD) es una herramienta en auge en el ámbito de la depuración de aguas, siendo capaz de simular aspectos hidráulicos, proporcionando información relativa a los campos de velocidades, líneas de flujo o tiempo de retención hidráulica, cuyo conocimiento facilita la propuesta de alternativas geométricas más eficientes. No obstante, su potencial va más allá de la fluidodinámica, resolviendo además flujos multifásicos, reacciones bioquímicas, el transporte de

partículas, entre otros, siendo ejemplos de ellos el estudio de la fluidodinámica en canal de oxidación, la bioquímica en reactor biológico y/o la desinfección en canal UV.

El estudio hidrodinámico de un reactor biológico permite la detección de zonas muertas o caminos preferentes de flujo que reflejan deficiencias en el funcionamiento del mismo. Resulta crucial identificar y optimizar su comportamiento, aumentando sustancialmente la eficacia del proceso de depuración, a la vez que se reducen los costes de operación (Sánchez et al., 2016).

Lo expuesto anteriormente evidencia la trascendencia de los aspectos hidrodinámicos, que se pueden desarrollar en los distintos reactores, que intervienen en el proceso de depuración. En el presente trabajo se analiza el funcionamiento de la cámara anaerobia de un reactor biológico tipo A2O mediante la creación de un modelo numérico tridimensional en FLOW-3D, estudiando la influencia que presentan aspectos como el tamaño de malla y el modelo de turbulencia seleccionado, sobre el tiempo de residencia hidráulico, la velocidad o la distancia recorrida por el fluido.

El capítulo que da comienzo consiste en una recopilación de las bases teóricas de la depuración de aguas residuales, donde se expone la secuencia de tratamiento en una estación depuradora de aguas residuales, así como los fundamentos del tratamiento biológico junto a las tipologías de reactores biológicos.

El segundo capítulo trata de presentar los principios que integran la Dinámica de Fluidos Computacional, donde cabe destacar el significado físico de las ecuaciones que rigen el comportamiento hidráulico y la importancia de la calidad del mallado al definir el dominio fluido, siendo imprescindible la discretización tanto espacial como temporal, además se describen las particularidades del régimen turbulento.

El tercer capítulo tiene por objeto introducirnos en la modelación en FLOW-3D, software con el que se ha trabajado y es en el cuarto capítulo donde se describe el reactor de estudio y se expone la metodología empleada para la creación del modelo numérico.

En capítulos posteriores se presentan los resultados obtenidos del análisis de sensibilidad del tamaño de malla y de los modelos de turbulencia y una discusión sobre los mismos que influirá de manera directa sobre las conclusiones extraídas y la propuesta de futuros desarrollos.

### **3. ESTADO DEL ARTE**

---

#### **3.1. Estación Depuradora de Aguas Residuales**

Una EDAR (Estación Depuradora de Aguas Residuales) es una planta destinada a la depuración de aguas residuales, constituidas por un conjunto de infraestructuras sanitarias, cuyo principal objetivo, es recoger las aguas de una población o industria para someterlas a tratamiento, de modo que se autorice su vertido a un cauce receptor en condiciones compatibles con él.

La selección de un proceso de depuración o la combinación adecuada de varios de ellos, va a depender de las características del agua bruta, de la calidad exigida al efluente, del coste de operación del sistema de tratamiento, de la disponibilidad de terreno y/o de la versatilidad de los equipos para adaptarse a requerimientos futuros.

Atendiendo al tipo de tratamiento, las EDARs pueden ser clasificadas en:

- Físicoquímicas: la depuración se produce mediante adición de agentes químicos, para favorecer la decantación de los sólidos en suspensión presentes en el agua residual.
- Biológicas: la depuración tiene lugar mediante procesos biológicos. Estos procesos se realizan con la intervención de microorganismos que actúan sobre la materia orgánica e inorgánica, en suspensión, disuelta y coloidal, que forma parte del agua residual, transformándola en sólidos sedimentables más fáciles de separar.

La experiencia empírica apuesta por combinar ambos tratamientos para alcanzar una depuración integral en las mejores condiciones técnicas y económicas.

No tratar el agua residual antes de su descarga, o una operación inadecuada de la planta, tiene como consecuencia efectos dañinos y en muchos casos irreversibles. La disminución de los niveles de oxígeno en los cursos receptores, los problemas de eutrofización, el considerable riesgo para la salud pública y el deterioro estético, son algunas de las consecuencias que justifican la necesidad de depuración.

Con objeto de mitigar el impacto negativo que ocasiona retornar el agua no tratada al ambiente, se han desarrollado diversas políticas que tratan de reducir las tensiones generadas por la actividad económica sobre el medio ambiente.

En este sentido, a nivel de la Unión Europea, existe una amplia legislación en materia de aguas, que regula el funcionamiento, composición y competencias de los Estados miembros, con el fin de proteger los recursos hídricos y por consiguiente el medio ambiente.

Cabe mencionar, entre otras:

- La Directiva 2000/60/CE del Parlamento Europeo y del Consejo de 23 de octubre de 2000, por la que se establece un marco para la actuación comunitaria en el ámbito de la política de aguas, que permita alcanzar el buen estado de las masas de agua en el año 2015, protegiéndolas y evitando su deterioro.
- La Directiva 91/271/CEE del Consejo, de 21 de mayo de 1991, sobre el tratamiento de las aguas residuales urbanas, en la cual se establece que los Estados miembros adoptarán las medidas necesarias para garantizar que dichas aguas son tratadas correctamente antes de su vertido. Referente a las estaciones de tratamiento de aguas, se velará por su correcto diseño, construcción y mantenimiento, de modo que se garantice un rendimiento suficiente ante variaciones en las condiciones climáticas de la zona.

La Tabla 1 recoge los requisitos de vertido, fijando aquellos parámetros cuyo control permite conocer el nivel de depuración alcanzado y con ello, el grado de cumplimiento de la Directiva 91/271/CEE.

| <i>ZONAS MENOS SENSIBLES – Tratamiento Primario</i> |  |                                |                                |
|---|--|--------------------------------|--------------------------------|
| <i>Parámetros</i>                                   | Porcentaje mínimo de reducción           |                                |                                |
| <i>DBO<sub>5</sub></i>                              | 20 %                                     |                                |                                |
| <i>Sólidos en suspensión</i>                        | 50 %                                     |                                |                                |
| <i>ZONAS NORMALES – Tratamiento Secundario</i>      |  |                                |                                |
| <i>Parámetros</i>                                   | Concentración del vertido                | Porcentaje mínimo de reducción |                                |
| <i>DBO<sub>5</sub></i>                              | 25 mg/l O <sub>2</sub>                   | 70-90 %                        |                                |
| <i>DQO</i>  | 125 mg/l O <sub>2</sub>                  | 75 %                           |                                |
| <i>Sólidos en suspensión</i>                        | 35 mg/l                                  | 90 %                           |                                |
| <i>ZONAS SENSIBLES – Tratamiento Terciario</i>      |  |                                |                                |
| <i>Parámetros</i>                                   | Concentración del vertido                |                                | Porcentaje mínimo de reducción |
|   | 10 <sup>4</sup> a 10 <sup>5</sup> hab-eq | >10 <sup>5</sup> hab-eq        |                                |
| <i>Fósforo total</i>                                | 2 mg/l P                                 | 1 mg/l P                       | 80 %                           |
| <i>Nitrógeno total</i>                              | 15 mg/l N                                | 10 mg/l N                      | 70-80 %                        |

*Tabla 1. Requisitos de depuración exigibles a las ARUs según la zona receptora. (Directiva 91/271/CEE).*

Cabe destacar también la Directiva 86/278/CEE, relativa a la protección del medio frente a la utilización de lodos de depuradora en agricultura, y la Directiva 2006/7/CE que recoge normas relativas a la gestión de la calidad de las aguas de baño al ser consideradas receptores de los efluentes líquidos urbanos, y por la que se deroga la Directiva 76/160/CEE.

A nivel nacional, la Constitución Española de 1978, ya reconoce el derecho a un medio ambiente adecuado para todos los españoles, obligando a protegerlo y conservarlo para las generaciones futuras. La Ley de Aguas 29/1985, de 2 agosto, protege el dominio público con el tratamiento y recuperación de las aguas para preservar su calidad y usos prioritarios, exigiendo autorización previa a todos los vertidos, impulsando la reutilización y fijando un sistema de sanciones y responsabilidades legales. Posteriormente, el Real Decreto-Ley 11/1995, de 28 de diciembre, establece las normas aplicables al tratamiento de las aguas residuales urbanas, que complementa al régimen jurídico de la Ley de Aguas.

El tratamiento de las aguas residuales engloba diversos procesos físicos, químicos y biológicos que reducen la contaminación del afluente, actuando de forma habitual sobre los componentes presentes en el siguiente orden: objetos gruesos, arenas, grasas, materia orgánica sedimentable, materia orgánica disuelta y coloidal, nutrientes y patógenos.

A la entrada de una instalación de este tipo, se dispone de un aliviadero o by-pass que impide el ingreso a planta de un caudal superior al de diseño, derivando el caudal en exceso durante episodios de lluvia. Resulta imprescindible en redes unitarias y para llevar a cabo operaciones de mantenimiento. Asimismo, se pueden distinguir dos líneas de tratamiento: la línea de agua y la línea de lodos.

La línea de agua está compuesta por las etapas de pretratamiento, tratamiento primario, tratamiento secundario y tratamiento terciario, en las que tienen lugar el tratamiento de las aguas residuales urbanas. Por su parte, la línea de lodos o fangos integra los procesos de espesamiento, estabilización, acondicionamiento y deshidratación del fango generado a lo largo de la línea de agua.

Como consecuencia de los procesos de tratamiento a los que se ven sometidos los caudales afluentes de aguas residuales, se generan dos corrientes salientes: efluentes depurados y lodos.

La Figura 1 muestra de manera simplificada, la secuencia típica en los procesos de tratamiento, distinguiéndose la línea de agua de la línea de fango.

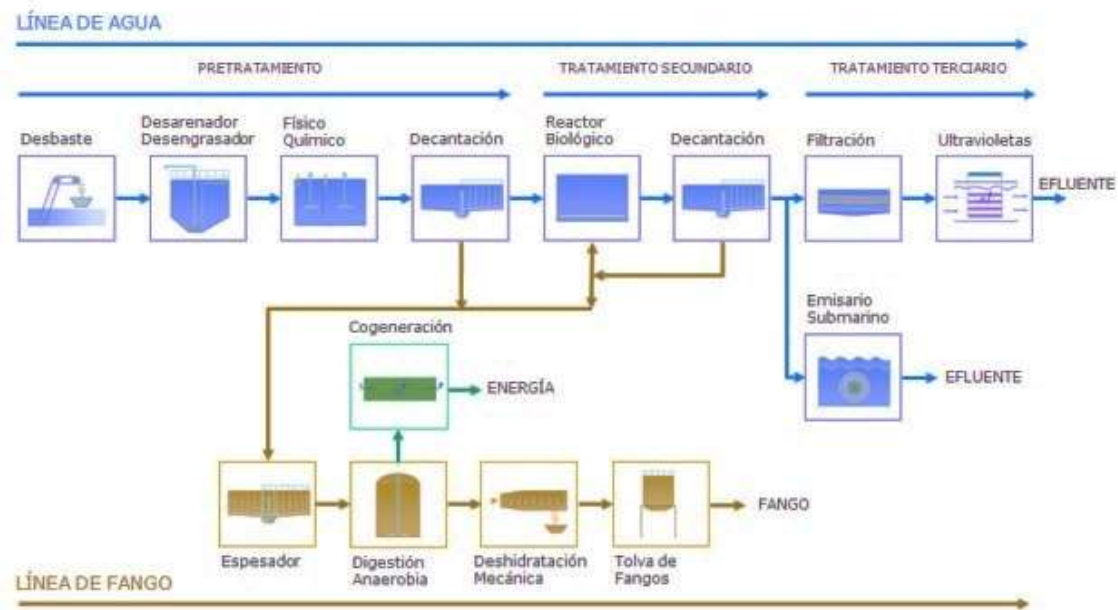


Figura 1. Diagrama de procesos. Línea de agua y línea de fango de una estación depuradora (EPSAR, 2018).

### 3.1.1. Línea de agua

En las estaciones depuradoras convencionales se distinguen dos líneas de funcionamiento. La línea de agua, que recoge los distintos tratamientos que integran el proceso de depuración, para reducir la contaminación de las aguas residuales, y la línea de fangos, encargada del tratamiento de los subproductos de la línea de agua.

Las aguas residuales son sometidas a un tratamiento previo o pretratamiento comprendido por una serie de operaciones físicas, capaces de separar de la corriente objetos que, por su naturaleza o tamaño, pueden ocasionar el deterioro de las etapas posteriores y la obstrucción de elementos como tuberías, válvulas y bombas. Se consigue eliminar la contaminación de entrada que permanece en suspensión, flotación o arrastre mediante operaciones de desbaste, desarenado y desengrasado.

El desbaste tiene lugar mediante el empleo de rejillas dispuestas en el canal de entrada a la planta, facilitando la retirada de sólidos de gran tamaño (trapos, ramas, botellas...), e impidiendo su llegada a las fases posteriores, para proteger las instalaciones aguas abajo. Las operaciones de desarenado y desengrasado, se pueden realizar de forma conjunta. La materia pesada de granulometría superior a 0.2 mm es depositada como consecuencia de la disminución de la velocidad experimentada por el flujo, mientras que la inyección de aire favorece la flotación de grasas, aceites, o espumas que son removidas con la ayuda de rasquetas superficiales.

El tratamiento primario se define como un proceso físico, complementado en ocasiones con procesos químicos, con el cometido de separar los sólidos en suspensión no retirados en el pretratamiento, siendo menos efectivo con la eliminación de materia orgánica. El total de sólidos en suspensión en las aguas residuales de entrada ha de experimentar una reducción de al menos un 50%, mientras que la *DBO<sub>5</sub>* se verá reducida en al menos un 20% antes del vertido.

El fenómeno de la decantación permite que partículas suspendidas con mayor densidad que el agua sedimenten por efecto de la gravedad. También se incluyen mecanismos de flotación por aire disuelto, que desalojan partículas en suspensión mediante burbujas de aire, y tratamientos fisicoquímicos con la adición de reactivos para aumentar la formación de sólidos sedimentables, mediante procesos de coagulación-floculación.

El tratamiento secundario tiene como propósito la transformación de la materia orgánica coloidal y disuelta, no separable por procesos fisicoquímicos, en materia celular decantable y productos finales. Consiste en proveer de nutrientes y de condiciones óptimas de pH, temperatura y salinidad a los microorganismos, aprovechando la actividad metabólica de los mismos sobre estos compuestos. El tratamiento secundario incluye un tratamiento biológico, que tiene lugar en un reactor biológico seguido por una decantación secundaria. En el tratamiento secundario también se eliminan nutrientes como nitrógeno y fósforo mediante procesos biológicos.

El tratamiento terciario es un tratamiento avanzado, con el que se logran mayores rendimientos en cuanto a la eliminación de la *DBO<sub>5</sub>*, materia en suspensión y contaminantes como nutrientes, metales pesados, virus, etc. Se emplea en zonas declaradas como sensibles debido a las exigencias del cauce receptor, y en zonas con escasez de agua donde se promueve la reutilización de estos efluentes, consiguiendo mejorar la calidad de los mismos. Se consigue una calidad de efluente superior a la del tratamiento secundario, por medio de la filtración o el uso de membranas, la desinfección por empleo de cloro gas, hipoclorito, dióxido de cloro, ozono, rayos ultravioleta y/o la reducción de sales.

### **3.1.2. Línea de fango**

Todos los subproductos provenientes de los tratamientos primario y secundario contienen un bajo porcentaje de materia sólida, estando constituidos en su mayoría por agua. Un aspecto importante es atender a la reducción de su volumen, así como también al acondicionamiento para su reutilización o evacuación final, lo que comprende la eliminación de olores y microorganismos patógenos.

El tratamiento de fangos generados durante la depuración de las aguas residuales persigue la reducción del contenido de agua, aumentando su concentración, de forma



que resulten manejables para los operarios de la planta y se facilite su transporte. Entre los destinos finales se encuentra la reutilización agrícola, la valorización energética o el depósito controlado en vertederos.

Se pueden distinguir dos tipos de fangos; los fangos primarios, obtenidos del decantador primario resultado de la separación fisicoquímica y con un carácter inorgánico; y los procedentes de procesos biológicos, denominados fangos secundarios, formados principalmente por materia orgánica o biomasa en exceso. En ocasiones, estos dos tipos de fangos se mezclan para ser tratados de forma conjunta en la línea de fangos y dan lugar a fangos mixtos, con composición variable en función de la carga contaminante inicial del agua bruta.

Los fangos son los elementos de rechazo, que se obtienen de las purgas de decantadores, acumulando contaminantes separados durante las distintas etapas de tratamiento. Es por ello que deben ser tratados adecuadamente antes de proceder a su evacuación, conforme a lo establecido en la Ley 22/2011, de 28 de julio, de residuos y suelos contaminados y cumpliendo con el Plan Nacional de Lodos de Depuradoras de Aguas Residuales (2001-2006).

Entre las etapas que componen la línea de fangos, es habitual encontrar el espesamiento como primer paso para reducir el volumen global de fango, mediante la expulsión de agua. El método convencional es el de gravedad, que se utiliza para el caso de fangos primarios o mixtos, y el de flotación utilizado para fangos biológicos, consiguiéndose con estos sistemas concentraciones de salida entre el 3 % y el 5 %. Destaca el empleo de sistemas innovadores como espesadores rotativos o mesas espesadoras.

Seguidamente se someten a un proceso de estabilización, con la finalidad de destruir la fracción biodegradable presente en los lodos, evitando su putrefacción y por consiguiente la generación de hedor. Esto se puede lograr mediante digestión aerobia o anaerobia, estabilización química elevando el pH con la adición de cal o tratamientos térmicos. En la digestión anaerobia, la materia orgánica en ausencia de oxígeno, es convertida en metano y dióxido de carbono por la acción de bacterias, viéndose favorecido el proceso al elevar la temperatura. En la digestión aerobia, por el contrario, se oxidan las materias biodegradables y la masa celular contenida en los fangos mediante la adición de aire.

Los fangos presentan una estructura coloidal que dificulta su filtrado durante la deshidratación, así bien, es necesario preparar el fango previamente. El acondicionamiento del fango aumenta la susceptibilidad a la concentración, al desestabilizar los coloides acelerando la eliminación de agua. Esto es posible mediante la adición de productos químicos (polielectrolitos orgánicos) o por acondicionamiento térmico, contribuyendo así a la deshidratación.

El fango espesado contiene un pequeño porcentaje de materia seca, lo que hace necesario una mayor concentración, confiriéndole características sólidas que faciliten su manipulación. Los sistemas de deshidratación más utilizados son los filtros banda y las centrífugas, que normalmente, consiguen concentraciones del 15-30% en materia seca. Los filtros prensa, a pesar de alcanzar sequedades del 40-45% forzando la evacuación del agua por aplicación de presiones elevadas, se utilizan sólo en casos excepcionales al operar en discontinuo con altos costes de explotación. Las eras de secado son viables, únicamente para pequeñas poblaciones, aunque cada vez son menos empleadas por los tiempos requeridos (10-15 días) y su elevada ocupación.

### **3.2. Fundamentos del tratamiento biológico**

De entre los procesos que tienen lugar en una EDAR, es el tratamiento biológico o secundario el que desempeña un papel preponderante (Grady et al., 2011). Está compuesto por el reactor biológico y el tanque de sedimentación secundario, considerándose la etapa más crítica y sensible del ciclo de tratamiento de aguas residuales (Metcalf & Eddy, 2004). De ahí que diversos autores coincidan al describir al reactor como el ‘corazón’ de la depuradora, realizándose sobre el mismo, multitud de investigaciones.

El fundamento de los procesos biológicos reside en el empleo de microorganismos, capaces de asimilar las sustancias halladas en suspensión o disueltas en el agua residual, quedando éstas incorporadas al metabolismo celular, otorgando la energía requerida para sus funciones vitales.

El metabolismo engloba procesos químicos que tienen lugar en el interior de las células distinguiendo entre:

- Catabolismo o respiración celular. Las reacciones catabólicas son reacciones químicas de oxidación-reducción, en las que intervienen compuestos reducidos (donador de electrones) como la materia orgánica, y compuestos oxidados (aceptor de electrones) como oxígeno o nitrato, que dotan a las células de energía y contribuyen a la degradación de la materia orgánica.
- Anabolismo o síntesis celular. Conjunto de reacciones químicas consumidoras de energía, involucradas en la síntesis de componentes celulares a partir de fuentes de carbono y otros nutrientes.

Es en los reactores biológicos (Figura 2), donde tienen lugar dichas reacciones, por lo que las condiciones ambientales deben ser favorables para el desarrollo de la biocenosis.

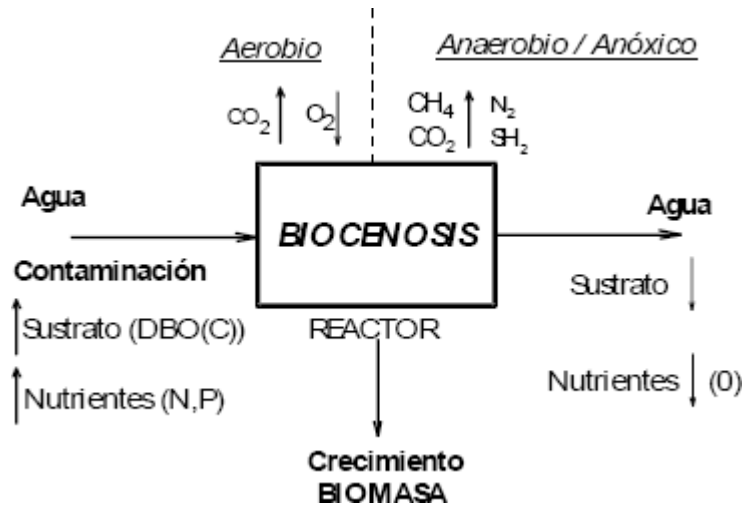


Figura 2. Esquema de los procesos metabólicos de oxidación/reducción (Obtenido de Pedreño, 2014).

Priman en abundancia comunidades de bacterias y protozoos, que suponen un 5% de la materia seca del licor mezcla. Algunos organismos como los rotíferos manifiestan un elevado tiempo de retención del fango y un manejo adecuado del proceso. Por el contrario, se ha de impedir la proliferación de bacterias filamentosas, que promueven el fenómeno de fango voluminoso o bulking, dificultando la obtención de una sedimentación eficaz.

En el proceso intervienen numerosas reacciones microbiológicas, que alteran o suprimen la materia orgánica, nutrientes y elementos tóxicos como metales pesados. Resulta interesante atender a factores que revelan el grado de biodegradabilidad de las aguas residuales, como puede ser la relación  $DBO_5/DQO$ , al proporcionar información relativa a la aptitud de las sustancias presentes, para ser empleadas por lo microorganismos, en la síntesis de nuevos tejidos y en la respiración celular. En la Tabla 2 se establece una clasificación de la materia orgánica según el valor de la razón  $DBO_5/DQO$ .

| $DBO_5 / DQO$ | Biodegradabilidad del agua residual |
|---------------|-------------------------------------|
| 0.4           | Alta                                |
| 0.2-0.4       | Normal                              |
| 0.2           | Baja                                |

Tabla 2. Biodegradabilidad del agua residual urbana según la relación  $DBO_5/DQO$  (Metcalf & Eddy, 2000).

Tras la apreciación de un aumento significativo de compuestos inorgánicos de nitrógeno y fósforo, que comprometen la calidad de las masas de agua al hacerlas susceptibles a la eutrofización, se ha implementado la búsqueda de nuevas tecnologías y métodos de depuración de aguas residuales, poniendo la atención en los procesos biológicos, debido a su mejor rendimiento económico y ecológico.

Tradicionalmente, los procesos biológicos se han orientado a la eliminación de la materia orgánica y sólidos, pero es a partir de los años ochenta cuando experimentan un cambio de paradigma al evidenciarse los efectos negativos que tienen elementos como el nitrógeno y el fósforo en los cauces receptores, secuenciando la aceleración de la eutrofización, la disminución de oxígeno disuelto y las afecciones a la vida acuática, así como dificultando el uso del recurso hídrico.

A propósito de ello, en los últimos años se ha potenciado la búsqueda de alternativas que admitan la remoción simultánea de nutrientes y que conlleven modificaciones en las tecnologías convencionales, abriendo paso a las innovaciones ingenieriles (You et al., 2003; Kargi et al., 2005).

La eliminación biológica de fósforo genera menor volumen de fangos y es susceptible de ser combinada con la eliminación de nitrógeno. De tal manera, se busca la alternancia de condiciones anaerobias, anóxicas y aerobias.

### **3.2.1. Procesos biológicos**

#### **3.2.1.1. Etapa anaerobia**

La etapa anaerobia se caracteriza por la ausencia de un aceptor externo de electrones, pudiendo emplearse el dióxido de carbono o parte de la materia orgánica con este fin. También se caracteriza por la presencia de bacterias acumuladoras de fósforo, que requieren de compuestos orgánicos fácilmente biodegradable, como los ácidos grasos volátiles (fundamentalmente acetato y propionato), que son almacenados intracelularmente como material de reserva en forma de poli- $\beta$ -hidroxibutirato o polihidroxivalerato. Los ácidos grasos volátiles pueden ser incorporados en la fase anaerobia, por medio del afluente, o bien son originados por organismos fermentadores en el reactor. La energía necesaria para asimilar los ácidos grasos es obtenida por la descomposición de cadenas de glucógeno y polifosfatos intracelulares, que conlleva la liberación de fosfatos al licor mezcla, tal y como refleja la Figura 3.

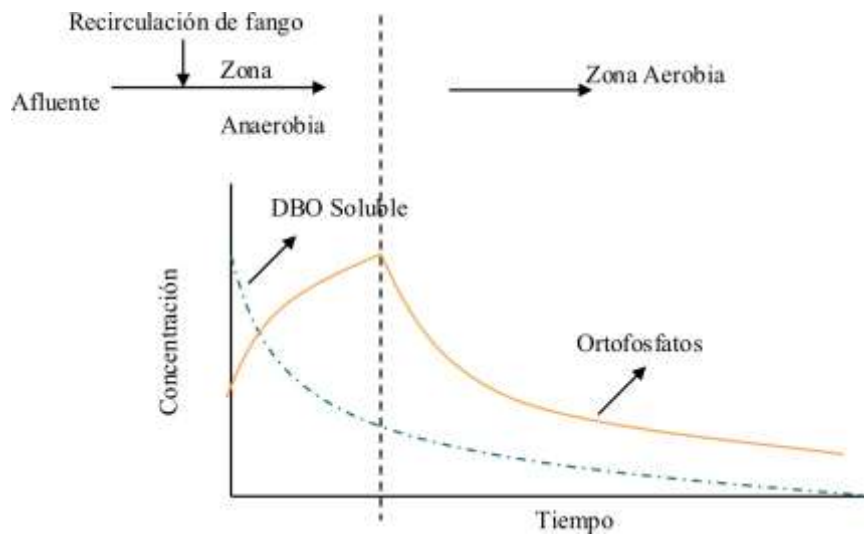


Figura 3. Esquema de eliminación biológica de fósforo (Venegas, 2015).

Sin embargo, la liberación de fosfatos experimentada durante la fase anaerobia se contrarresta en etapas posteriores en las que estos organismos demandan fosfatos por encima de sus requerimientos metabólicos, posibilitando la defosfatación. Barnard (1974) postuló que "el requerimiento esencial para la remoción de fósforo en un sistema biológico es que, durante alguna etapa antes de la etapa final del proceso, el lodo o el licor mezclado pase a través de una etapa anaerobia durante la cual los fosfatos pueden o no ser liberados, seguido por una etapa aireada durante la cual los fosfatos serán absorbidos por los organismos o serán precipitados como resultados del cambio de potencial redox".

En estos sistemas coexisten organismos heterótrofos con bacterias acumuladoras de fósforo. A pesar de ello, las condiciones anaerobias benefician que bacterias acumuladoras de fósforo no tengan que competir por el sustrato, al permitirles la absorción de ácidos grasos de cadena corta más rápidamente. Este hecho es contrario al que se produce frente condiciones aerobias o anóxicas, donde se ralentiza esta operación debido a la acción de los organismos heterótrofos.

El proceso de digestión anaerobia se subdivide en cuatro etapas: hidrólisis, acidogénesis, acetogénesis y metanogénesis, con las que se consigue la conversión de la materia orgánica en metano y dióxido de carbono.

Durante la hidrólisis, la materia lentamente biodegradable o materia orgánica particulada es degradada para generar compuestos disueltos menos complejos, debido a la acción de enzimas excretadas por bacterias. Elementos como nitrógeno y fósforo, integrantes de la materia orgánica, son liberados en forma de nitratos y fosfatos, respectivamente.

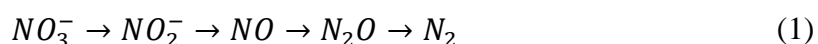
Posteriormente, las bacterias acidogénicas responsables de la fermentación, transforman los compuestos disueltos, resultado de la hidrólisis y capaces de atravesar la membrana celular, en ácidos grasos volátiles, alcoholes, dióxido de carbono, hidrógeno gas, amoniaco, sulfuro de hidrógeno, así como en materia celular.

Los ácidos grasos de cadena corta producidos durante la acidogénesis son transformados, posteriormente, en ácido acético, hidrógeno y dióxido de carbono por las bacterias acetogénicas para su crecimiento.

La metanogénesis, constituye la etapa final de la conversión anaeróbica, aunque estas bacterias raramente se desarrollan. Los metanógenos son anaerobios estrictos y se pueden distinguir entre bacterias metanogénicas acetoclásticas e hidrogenotróficas en función del elemento precursor de metano.

### 3.2.1.2. *Etapa anóxica*

En el ambiente anóxico, dada la recirculación procedente de la etapa aerobia posterior, todo el nitrógeno se halla en forma de nitratos. Ante la ausencia de oxígeno disuelto tiene lugar la desnitrificación. Los óxidos de nitrógeno son utilizados por bacterias heterótrofas facultativas, capaces de modificar su metabolismo celular y emplear nitratos y nitritos como aceptores finales de electrones para la respiración celular, produciendo nitrógeno gas que escapa a la atmósfera, agua y dióxido de carbono, así como un consumo del carbono orgánico biodegradable presente en el agua residual. La siguiente expresión muestra el proceso que se produce en esta etapa.



Estos microorganismos son capaces de utilizar el oxígeno de los nitratos como fuente de energía, oxidando el carbono orgánico y generando dióxido de carbono. Además, emplean amonio y fosfatos en la síntesis de microorganismos.

De manera similar a la etapa anterior, son responsables de la hidrólisis de la materia orgánica particulada bajo condiciones anóxicas. La tasa de hidrólisis de la materia orgánica lentamente biodegradable es más lenta bajo condiciones anóxicas que bajo condiciones aerobias (Stern & Marais, 1974; van Haandel et al., 1981).

Por otro lado, las bacterias acumuladoras de fósforo consumen el sustrato almacenado durante condiciones anaerobias (ácidos grasos volátiles en forma de poli- $\beta$ -hidroxibutirato o polihidroxicvalerato), obteniendo los requerimientos de energía y carbono para el crecimiento celular, siendo necesario también amonio y fosfato en la síntesis de nuevo tejido. Una fracción de esta energía se invierte en la acumulación de fósforo del medio, a fin de regenerar polifosfatos y glucógeno consumidos en fase

anaerobia. En la Figura 4, se representa la actividad de las bacterias acumuladoras de fósforo según se encuentren en la fase anaerobia o en la fase anóxica/aerobia.

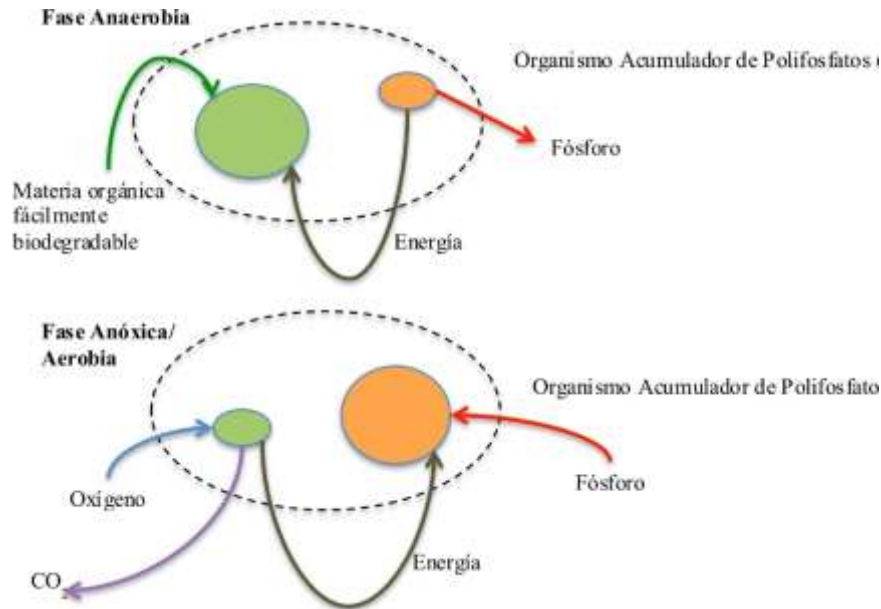
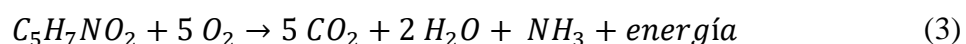
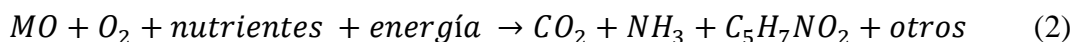


Figura 4. Modelo bioquímico simplificado de las bacterias acumuladoras de fósforo (Venegas, 2015).

### 3.2.1.3. Etapa óxica

En un sistema aerobio, donde el oxígeno es el elemento aceptor de electrones, la elevada tasa de consumo de materia orgánica rápidamente biodegradable por parte de microorganismos heterótrofos contribuye a su crecimiento, para lo que requieren además nutrientes de nitrógeno y fósforo.

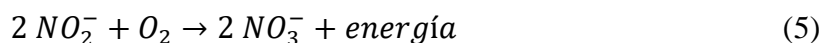
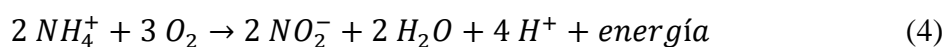
Las bacterias heterótrofas utilizan la materia orgánica como fuente de carbono para la síntesis celular. Mientras, la energía necesaria procede de la oxidación de su contenido de materia orgánica. Cuando se agota el sustrato exterior, el protoplasma se oxida y consume, liberando productos como agua, dióxido de carbono y nutrientes, siguiendo la siguiente reacción.



A causa del proceso de hidrólisis emprendido por bacterias heterótrofas, los compuestos complejos pasan a estar disponibles para el crecimiento, siendo esta conversión relativamente más rápida al estar sometida a condiciones aerobias.

Persiste la formación de nuevas células por parte de las bacterias acumuladoras de fósforo, a expensas del sustrato almacenado en forma de poli- $\beta$ -hidroxibutirato o polihidroxivalerato. Asimismo, la regeneración de polifosfatos conlleva la acumulación intracelular de fósforo por encima de las cantidades emitidas en la etapa anaerobia. Las bacterias acumuladoras de fósforo son eliminadas del sistema por medio de la purga de fango, lo que posibilita la eliminación neta del nutriente.

La oxidación biológica de nitrógeno orgánico y amoniacal por bacterias nitrificantes autótrofas aerobias constituye un proceso conocido como nitrificación, desarrollado en dos etapas frente condiciones aerobias (Figura 5). En efecto, el amonio se oxida a nitrito y luego a nitrato.



Estas bacterias autótrofas utilizan el dióxido de carbono como fuente de carbón, al ser capaces de realizar su metabolismo a partir del carbón contenido en sustancias inorgánicas.

Teniendo en cuenta las ecuaciones generales que rigen el proceso, se observa que la nitrificación lleva asociada la reducción del pH del licor mezcla, hecho poco significativo siempre y cuando se respalde con la recuperación de la alcalinidad durante la desnitrificación. Un control riguroso de las condiciones de pH, temperatura, concentración de nutrientes o adición de oxígeno, con influencia significativa en el desarrollo de los microorganismos, previene la inactividad microbiana.

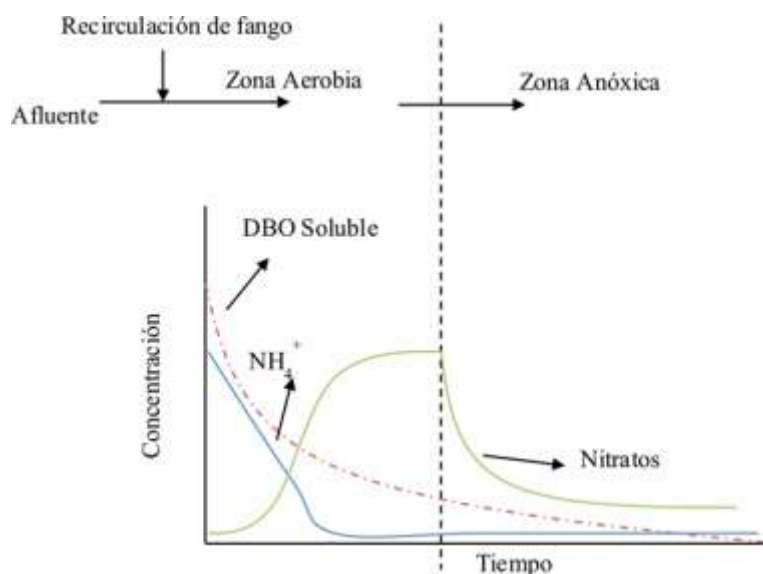


Figura 5. Esquema de eliminación biológica de nitrógeno (Venegas, 2015).



El ambiente aerobio en el reactor se consigue mediante el uso de difusores o aireadores mecánicos, sujetos a un doble cometido, al mantener la mezcla de la suspensión reactante.

La segregación de polímeros extracelulares por parte de los microorganismos que participan en la depuración, tiene como resultado la formación de flóculos compactos fácilmente separables del agua tratada, por incidencia de la gravedad en el decantador secundario. La composición de los fangos incorpora materia particulada o coloidal, de naturaleza orgánica e inorgánica, aportada por el agua residual, que se encuentra adherida a la biomasa. Habitualmente, una fracción de lodo es recirculado para mantener una concentración estable en el reactor.

La calidad del efluente está en consonancia con el grado de sedimentación alcanzado. Por consiguiente, es común la medición del Índice Volumétrico de Fangos (IVF) o Índice de Mohlman que describe el volumen que un gramo de lodos ocupa después de treinta minutos en una probeta graduada de un litro, permitiendo identificar una de las tipologías de fango reflejadas en la Tabla 3.

| Tipo de Fango        | IVF (mg/l) |
|----------------------|------------|
| Buena decantabilidad | <100       |
| Ligero               | 100-200    |
| Bulking              | < 200      |

Tabla 3. Decantabilidad de un fango activado de acuerdo con su IVF (Wanner, 1997).

### 3.2.2. Cinética de los procesos biológicos

La totalidad de los procesos biológicos están vinculados con la creación y explotación de nichos ecológicos de microorganismos, justificando la importancia del conocimiento de las leyes de crecimiento, dependientes a su vez de la utilización de sustrato, para lograr un control eficaz del medio reactante.

La velocidad de formación de microorganismos se encuentra relacionada con la velocidad de consumo de sustrato a través del factor de rendimiento. El aumento en la concentración de fangos es proporcional a la disminución del sustrato utilizado.

$$r_X = Y_X (-r_S) \quad (6)$$

donde,

$r_X$ : velocidad de formación de microorganismos (Kg microorganismos/s m<sup>3</sup> reactor).

$r_S$ : velocidad de consumo de sustrato (Kg sustrato/s m<sup>3</sup> reactor). Esta velocidad es negativa al ser la materia orgánica degradada.

$Y_X$ : factor de rendimiento de producción de lodos a expensas del sustrato consumido (Kg microorganismos formados/Kg sustrato consumido).

Se define la velocidad específica de crecimiento de microorganismos como:

$$\mu = r_X / X \quad (7)$$

siendo  $X$  la concentración de microorganismos (Kg microorganismos/ m<sup>3</sup> reactor). La velocidad específica  $\mu$  tiene unidades de (tiempo)<sup>-1</sup>.

La velocidad específica de crecimiento de microorganismos se encuentra relacionada con la concentración de sustrato, constituyendo una de las expresiones más empleadas. La ecuación de Monod considera el efecto de un sustrato limitante:

$$\mu = \frac{\mu_{max} \cdot S}{K_S + S} \quad (8)$$

siendo,

$\mu_{max}$ : velocidad máxima de crecimiento de microorganismos (tiempo)<sup>-1</sup>.

$S$ : concentración de sustrato (Kg sustrato/ m<sup>3</sup> reactor).

$K_S$ : constante de saturación (Kg sustrato/ m<sup>3</sup> reactor).

A partir de las expresiones anteriores se deduce la velocidad de utilización del sustrato en cultivos microbianos:

$$r_S = -\frac{r_X}{Y_X} = -\frac{\mu \cdot X}{Y_X} = -K \cdot \frac{S \cdot X}{K_S + S} \quad (9)$$

donde  $K = \mu_{max} / Y_X$  representa la tasa máxima de utilización del sustrato por unidad de masa de microorganismos.

La velocidad de formación de microorganismos debe ser corregida para considerar el efecto de la descomposición endógena, fenómeno que engloba los requerimientos energéticos para el mantenimiento celular, así como la muerte y depredación.

Asumiendo que la disminución de la masa celular es proporcional a la concentración de organismos, se puede formular la velocidad  $r_d$  definida como microorganismos muertos por unidad de tiempo y volumen:

$$r_d = -k_d \cdot X \quad (10)$$

con  $k_d$ : coeficiente de descomposición endógena (tiempo)<sup>-1</sup>.

De este modo, queda:

$$r_X = Y_X (-r_S) = \frac{\mu_{max} \cdot S \cdot X}{K_S + S} - k_d \cdot X \quad (11)$$

La expresión correspondiente a la tasa neta de crecimiento específico  $\mu'$  viene dada por:

$$\mu' = \frac{\mu_{max} \cdot S}{K_S + S} - k_d \quad (12)$$

### 3.3. Reactor biológico

El reactor biológico es una infraestructura hidráulica concebida para el tratamiento de aguas residuales, cuya función es contribuir al desarrollo de ambientes requeridos para el cultivo de grupos de microorganismos funcionales capaces de actuar sobre la materia orgánica, disuelta o coloidal, no sedimentable, estabilizando la carga de contaminación del efluente mediante el ajuste de condiciones operativas que aceleran la tasa de utilización del sustrato.

Para alcanzar un elevado rendimiento del proceso es conveniente que el reactor sea alimentado con un caudal constante en magnitud y concentración, manteniendo uniformes las condiciones en su interior. Durante la explotación la realidad será distinta al atender a variaciones diarias relacionadas con el consumo de abastecimiento y con el desarrollo económico de la zona.

La importancia de la agitación y mezcla se debe a la necesidad de mantener la biomasa en suspensión, garantizando el contacto entre el agua residual y los lodos, al tiempo que se evitan anomalías en el comportamiento del flujo, eliminando zonas muertas y maximizando el volumen útil del reactor.

Entre los factores determinantes en el funcionamiento de un digestor encontramos la temperatura, el tiempo de retención, el valor del pH y alcalinidad, la presencia de

nutrientes, y la presencia y concentración de sustancias tóxicas (van Haandel & van der Lubbe, 2012).

Para el dimensionamiento de estas unidades, tradicionalmente se ha atendido a parámetros de entrada como el caudal, la carga másica, la demanda bioquímica de oxígeno al quinto día, la concentración de sólidos en suspensión, el tiempo de residencia celular, tratando de determinar el tiempo de retención hidráulico (THR) con el que se consiguen los niveles de reducción previstos. Esto supone una tasa de renovación homogénea del fluido, debiéndose cumplir la siguiente expresión:

$$THR = \frac{\text{Volumen del reactor}}{\text{Caudal}} \quad (13)$$

Este procedimiento, a pesar de ser empleado en la selección del volumen del reactor, presenta grandes deficiencias al no contemplar los fenómenos hidráulicos. Razón por la cual, no se logran los rendimientos esperados en multitud de ocasiones, poniéndose de manifiesto el interés que suscita el análisis hidráulico.

### **3.3.1. Digestores aerobios de cultivo en suspensión**

El tratamiento de fangos activos tiene como principio básico el empleo de un cultivo microbiano aerobio en contacto con el agua residual, en un sistema aireado y agitado. Al objeto de mejorar la eficiencia, han surgido variaciones en cuanto al modo de operación de los reactores empleados, que pasan a ser descritos a continuación.

- Digestor tipo pistón: proceso tradicional de lodos activos constituido por un reactor de aireación, usualmente con forma de canal alargado, y un clarificador secundario (Figura 6). El licor mezcla entra por uno de los extremos del canal y fluye a lo largo del eje longitudinal, siendo aireado por un periodo aproximado de seis horas. La concentración de contaminantes disminuye a lo largo del tanque según la dirección del flujo, del mismo modo que se reduce la demanda de oxígeno disuelto. Parte del lodo es recirculado para generar una alta concentración de microorganismos activos al ingreso del tanque de aeración (Srinivias, 2008). Teóricamente, las propiedades del licor mezcla son diferentes en cada sección del tanque al admitirse que un volumen líquido no se mezcla con los que se encuentran inmediatamente antes o después.

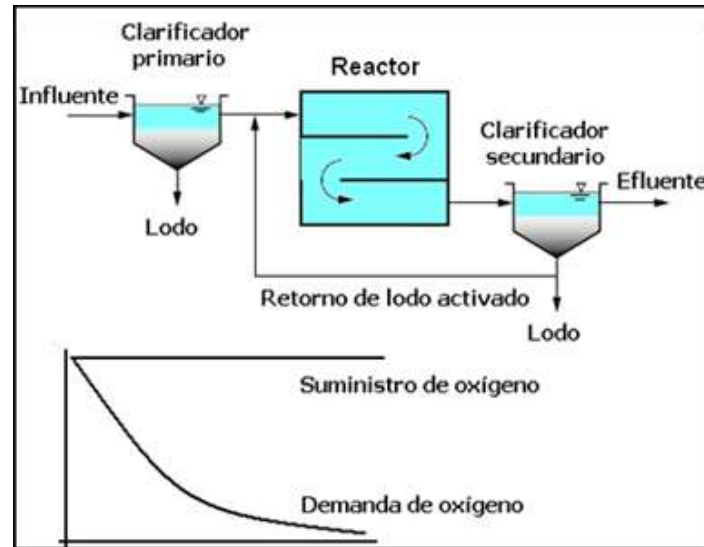


Figura 6. Reactor de lodos activos tipo pistón (Asano et al., 2007).

- Digestor de mezcla completa: el agua residual se introduce en el tanque de aireación (Figura 7) manteniendo uniformes la carga orgánica, la concentración de sólidos suspendidos y el oxígeno disuelto a lo largo del mismo. Presenta el inconveniente de operar con concentraciones orgánicas bajas, lo que promueve el crecimiento de bacterias filamentosas causantes de hinchamiento en el lodo.

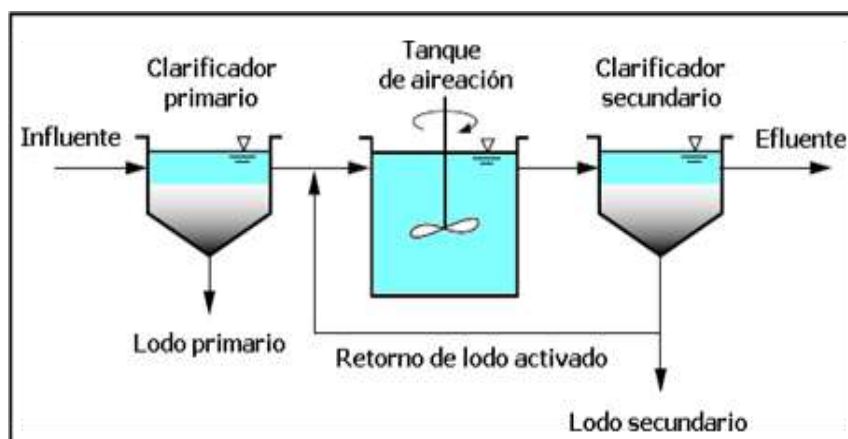


Figura 7. Reactor de mezcla completa (Asano et al., 2007).

- Digestor con alimentación escalonada: tiene por objetivo crear diversos picos de actividad bacteriana y de demanda de oxígeno disuelto, al incorporar el agua residual a través de diferentes puntos a lo largo de la dirección del flujo, manteniendo un lodo con altas propiedades absorbentes (Figura 8). Distribuye la carga orgánica separando el flujo del afluente.

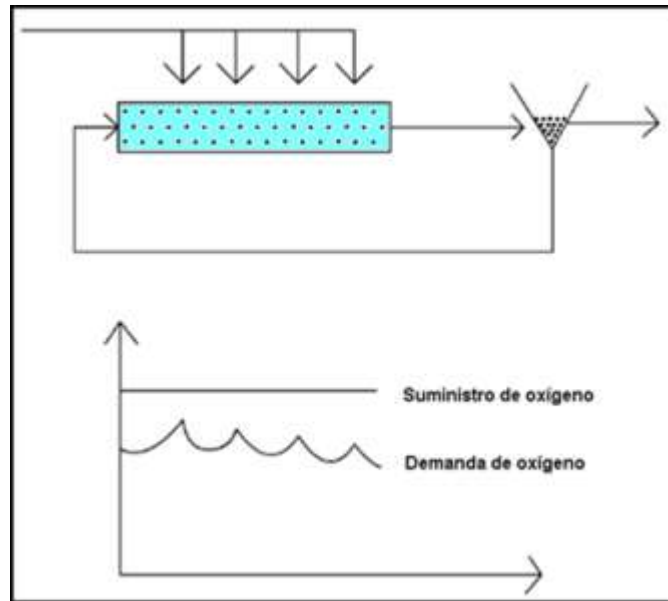


Figura 8. Digestor con alimentación escalonada (Srinivas, 2008).

- Digestor de aireación extendida: el reactor opera en la fase de respiración endógena, con baja concentración de sustrato frente a la biomasa y elevados tiempos de retención celular. Al no disponer de sustrato suficiente, los microorganismos consumen su propio tejido celular, lo que genera menos volumen de lodo.
- Digestor con aireación proporcional: este sistema se caracteriza por una disminución del suministro de aire a lo largo de la longitud del flujo (Figura 9). La reducción de exceso de aireación, inhibe el crecimiento de bacterias nitrificantes, las cuales originan altas demandas de oxígeno (Srinivas, 2008).

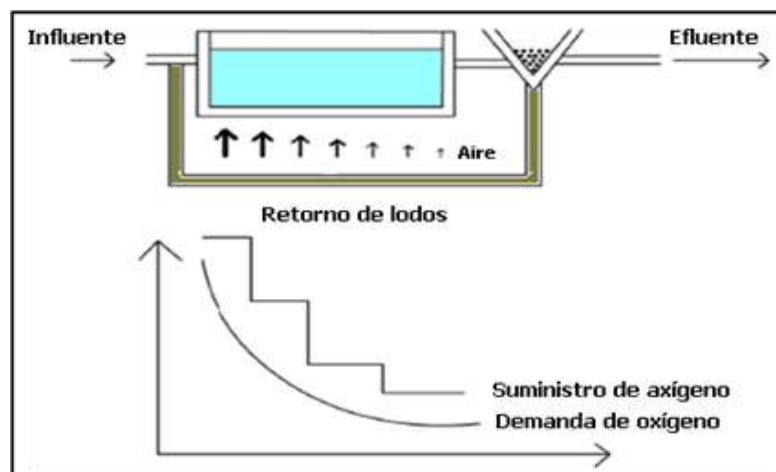


Figura 9. Digestor de aireación proporcional (Srinivas, 2008).

- Reactores discontinuos secuenciales (SBR): es un sistema de lodos activos alternativo de operación en discontinuo con gran flexibilidad para la eliminación de nutrientes, permitiendo combinar en un mismo tanque los procesos de reacción, aireación y clarificación. Se pueden distinguir cuatro ciclos. La primera fase o fase de llenado, consiste en la entrada de agua residual al reactor, donde es puesta en contacto con una biomasa aclimatada. Seguidamente, durante la segunda fase o fase de reacción el agua residual es mezclada y aireada consiguiendo la degradación de la materia orgánica por parte de los microorganismos. Se pueden alternar fases aerobias y anóxicas que conducirían a la eliminación de nitrógeno. En el tercer ciclo o etapa de decantación cesa la agitación y aireación, generando condiciones de reposo que conllevan al depósito de fangos biológicos floculados, siendo la decantación zonal, y quedando el agua tratada en la parte superior del reactor. Ya en la última fase se procede al vaciado del agua tratada y a la purga de fango en exceso, para mantener constante la concentración de sólidos y una edad de fango adecuada. Generalmente, se trabaja con un tiempo de retención hidráulica de uno a diez días, estando el tiempo de retención celular entre diez y quince días. Por otro lado, la concentración de sólidos en suspensión del licor mezcla (SSLM) se establece entre 1.500 y 5.000 mg/L. La efectividad es comparable a la de los sistemas convencionales logrando una buena reducción de *DBO* y nutrientes.
- Reactor de biomembrana (MBR): sistema compacto que integra el proceso de fangos activos con la separación física, mediante membranas sumergidas de fibra hueca o membranas dispuestas externamente a la unidad biológica, de microfiltración o ultrafiltración. Es una alternativa en espacios reducidos al prescindir de decantador secundario. El reactor es operado con elevada concentración de sólidos en suspensión volátiles y la clarificación se sustituye por módulos de membrana. La filtración a través de las membranas se produce por diferencia de presión transmembrana, creada por una bomba de succión. Es posible la separación del tiempo de retención hidráulica y el tiempo de retención celular, alcanzándose altas edades de fango con menor producción de fangos.
- Canal de oxidación: trabaja bajo la modalidad de fangos activos y consiste en un canal circular u oval (Figura 10), cuya configuración, aireación y mezcla promueven un flujo unidireccional, siendo la energía usada en la aireación suficiente para proporcionar una mezcla adecuada, dentro de un TRH relativamente largo. A medida que el agua residual se aleja de la zona de aireación, la concentración de oxígeno disuelto disminuye en virtud de los procesos de desnitrificación (Asano et al., 2007).

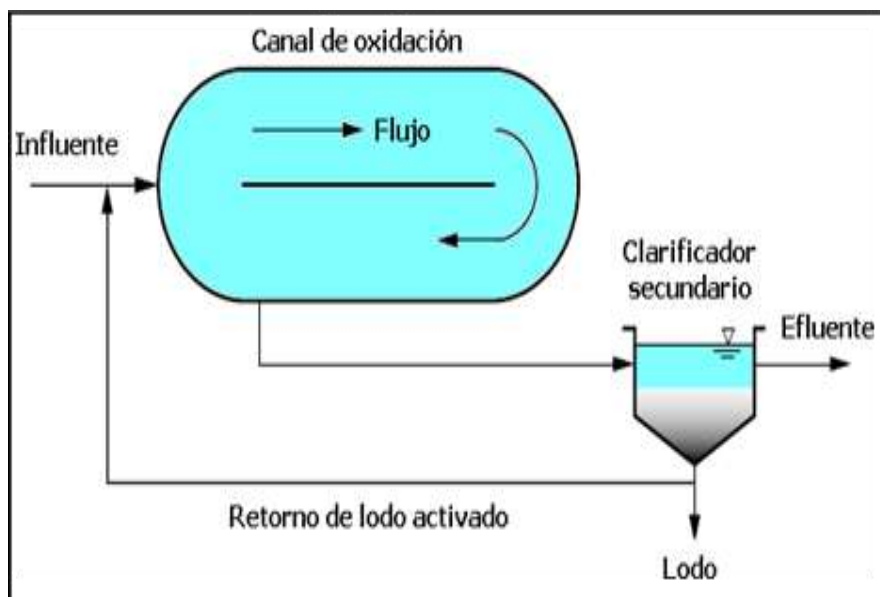


Figura 10. Canal de oxidación (Asano et al., 2007).

### 3.3.2. Digestores aerobios de cultivo fijo

Existen alternativas que se caracterizan por el crecimiento de un cultivo fijo de biopelícula o biomasa, adherida sobre un medio sólido, alcanzando concentraciones de microorganismos suficientes sin necesidad de recirculación. Estos sistemas han demostrado su eficiencia y flexibilidad en el tratamiento de aguas residuales ante altas cargas orgánicas, dada la elevada actividad metabólica que se atribuye a las concentraciones de nutrientes en la biopelícula. Se puede distinguir entre:

- Filtros percoladores: cuba o depósito donde se ubica un lecho, constituido por material con gran superficie específica, sobre el que se desarrolla la película biológica (Figura 11). El agua residual se rocía uniformemente en superficie, migrando por los poros del filtro hasta atravesar la totalidad del lecho filtrante, siendo recogida por un sistema de drenaje interno. Con esta metodología, la biomasa que cubre el filtro es capaz de llevar a cabo la degradación de la materia orgánica, siendo la reducción función de la superficie de contacto. Al aumentar el espesor de la película con el crecimiento de los microorganismos, el oxígeno se consume antes de alcanzar el extremo inferior del filtro. Las capas exteriores se encuentran en condiciones aerobias. A mayor carga orgánica en el afluente, menor será el espesor de esta capa, mientras que las condiciones de las capas inferiores pueden considerarse anaerobias. El espesor de la película es autorregulable, de modo que a medida que aumenta el espesor, los microorganismos entran en fase de respiración endógena y se desprenden, iniciándose el crecimiento de una nueva capa biológica. Posteriormente, el



líquido recogido pasa al decantador secundario, donde se separan los sólidos desprendidos, siendo necesario recircular parte del agua tratada para conservar húmedo el medio.

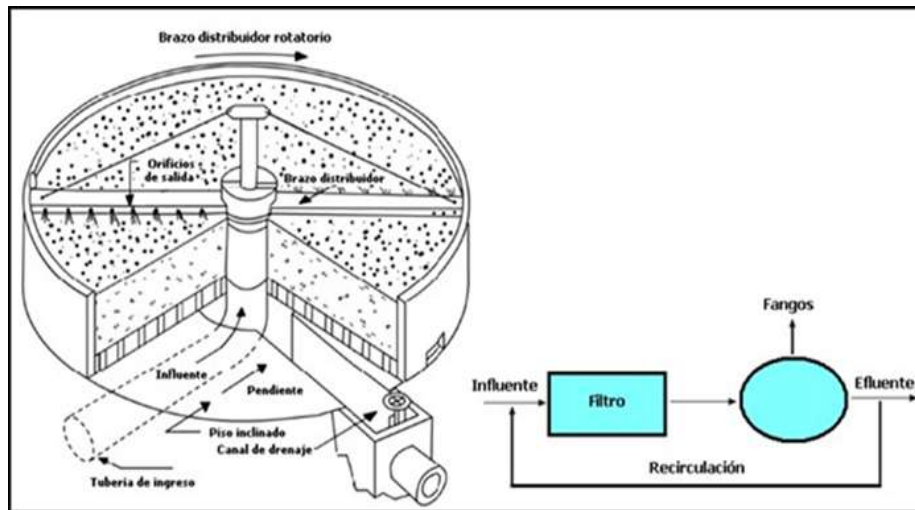


Figura 11. Esquema de un filtro percolador (Adaptado desde Romero, 2000)

- Contactor biológico rotativo (CBR): en esta tipología los microorganismos se encuentran adheridos a un material soporte, que rota sobre un eje horizontal, estableciendo el contacto alternativo de la biomasa con el agua residual a tratar y con el oxígeno atmosférico, al encontrarse parcialmente sumergido. La biomasa emplea el sustrato del agua residual para llevar a cabo su metabolismo, contribuyendo a la degradación de la materia orgánica durante la fase de inmersión y bajo condiciones aerobias. Se debe prestar atención al riesgo de congelación de la biopelícula en climas fríos. A su vez, se puede distinguir entre biodiscos y biocilindros. Los biodiscos están formados por una serie de discos, que proporcionan soporte a la comunidad de microorganismos, fabricados normalmente con materiales plásticos y diámetros de 2 a 4 m. Se disponen en paralelo y con separación reducida, unidos a un eje horizontal que atraviesa sus centros. Por otro lado, los biocilindros consisten en una jaula cilíndrica perforada, que alberga al material plástico portante.
- Filtro de lecho móvil (MBBR): el principio básico es el empleo de soportes plásticos, de alta superficie específica, sobre los que se desarrolla el cultivo bacteriano, dispuestos en continuo movimiento en el interior del reactor, mediante la agitación generada por el sistema de aireación (Figura 12). No se

requiere recirculación de fangos, siendo la biopelícula formada en las paredes del soporte, más efectiva que los flóculos biológicos.

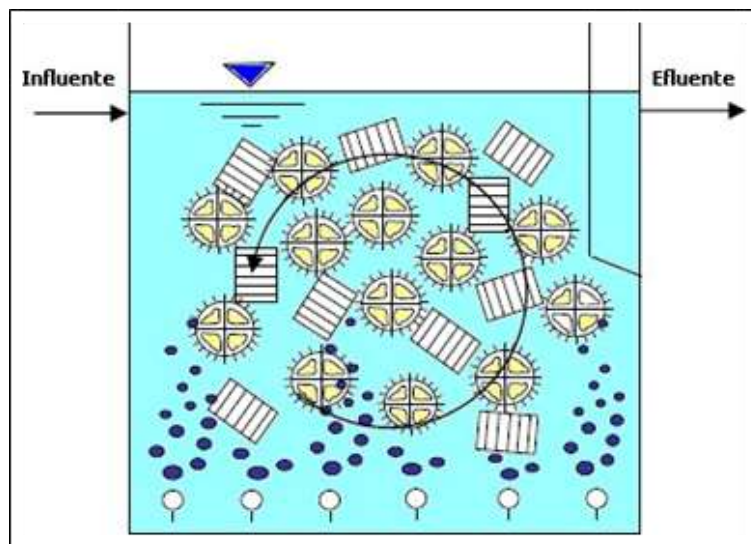


Figura 12. Filtro de lecho móvil (Zalakain, 2010).

### 3.3.3. Digestores anaerobios

El interés por los procesos anaeróbicos surge en los años setenta ante la crisis energética, que decantó la balanza hacia tecnologías energéticas eficientes. La limitación impuesta por las bacterias metanogénicas conlleva al diseño de reactores con alta concentración de microorganismos reduciendo el volumen requerido.

- Los filtros anaerobios son tanques rellenos de material inerte inmóvil, sobre el que se adhiere la biopelícula anaerobia, alcanzando rendimientos elevados en la eliminación de materia orgánica, guardando relación directa con la temperatura y el tiempo de retención hidráulica, cuya disminución conducen a tasas de eliminación inferiores. El afluente atraviesa el reactor con flujo vertical, bien ascendente o descendente. Está indicado para el tratamiento de aguas residuales con bajo contenido en sustancias sólidas, o cuando se dispongan sistemas de tratamiento previos para la retención de sólidos.
- El reactor de manto de lodos de flujo ascendente (UASB) dispone de una zona de reacción situada en la parte inferior del reactor, donde se acumulan lodos biológicamente activos con elevada sedimentabilidad que no requieren del uso de soportes (Figura 13). El afluente se introduce por el fondo, asegurando la uniformidad del flujo de entrada, y experimenta un flujo ascendente a través de

un manto de fango constituido por gránulos y flóculos. La velocidad ascensional se encuentra entre 0.6 y 0.9 m/h. Es durante el contacto del agua residual con el lecho, cuando tiene lugar la degradación de sustratos orgánicos, así como la producción de biogás, producto característico de la descomposición anaeróbica. El afluente en su recorrido puede arrastrar algunos de los sólidos hasta alcanzar la parte superior del reactor, donde la presencia de un separador gas-sólido-líquido, impide su salida separando internamente la biomasa, el efluente tratado y el biogás.

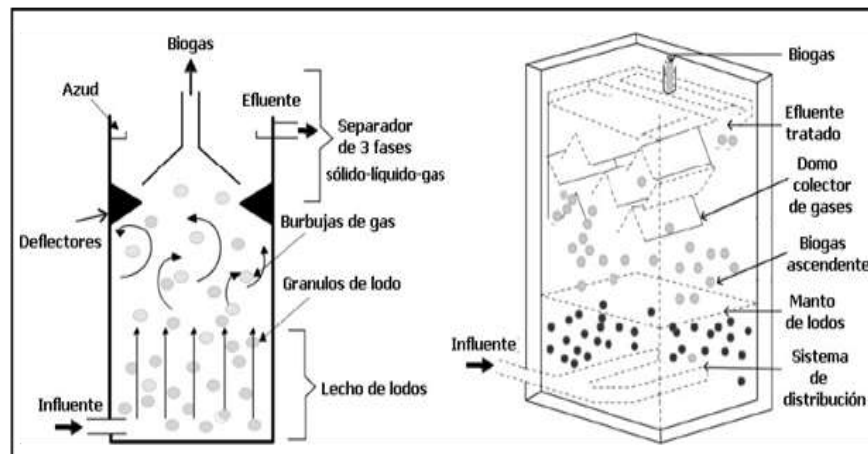


Figura 13. Reactor de manto de lodos de flujo ascendente (Srinivas, 2008)

- El reactor de lecho granular expandido (EGSB) es una variante del proceso anterior. Se caracteriza por el empleo de un medio granular a modo de soporte para la biopelícula bacteriana encargada de la degradación anaerobia. Este lecho se fluidiza a fin de evitar la formación de caminos preferenciales y la existencia de zonas muertas. La expansión del lecho promueve un mayor contacto entre la biomasa y el agua residual, para lo que se opera con velocidades ascensionales superiores a 4 m/h, conseguidas por empleo de mayores caudales de recirculación y aumento de la producción de biogás que proveen un mayor mezclado.

### 3.3.4. Digestores para la eliminación de nutrientes

La reducción biológica simultánea de nutrientes es posible con la modificación del proceso tradicional de fangos activados, incluyendo zonas con o sin aireación, para crear una secuencia de zonas aerobias, anóxicas y anaerobias (Metcalf & Eddy, 1996). A continuación, se describen algunas de las configuraciones más empleadas.

- El reactor AO presenta una configuración dirigida a la eliminación de fósforo en sistemas de lodos activos de flujo continuo. Alberga una zona anaerobia para la actividad metabólica, en la que se persigue la eliminación de fósforo, seguida de una zona óxica, donde se completa el proceso de eliminación biológica de fósforo y tiene lugar la reducción de la materia orgánica. Cuando se requiere la eliminación de nitrógeno, basta con modificar la zona anaerobia, sustituyéndola por una zona anóxica e incorporar un flujo de recirculación interno, siendo este proceso conocido como AON, de predenitrificación o de Ludzack-Ettinger modificado. En el proceso Ludzack-Ettinger original, la zona anóxica y óxica del reactor se encuentran comunicadas parcialmente y la recirculación se realiza a la zona óxica alcanzando un grado pobre de desnitrificación. Las configuraciones de postdenitrificación y de prepostdenitrificación son dos alternativas al proceso AON, en las cuales la zona anóxica se ubica en diferentes posiciones relativas respecto a la zona aerobia.
- En el Reactor tipo Bardenpho, el uso de dos zonas de desnitrificación asegura la eliminación total de nitrógeno, lo que ocasiona tiempos de retención hidráulica elevados. Se dispone la aerobia como última etapa, para evitar procesos de desnitrificación en el decantador, con la consiguiente flotación del fango. El proceso Bardenpho de 5 etapas es una extensión del proceso anterior, para conseguir la eliminación de fósforo alcanzando buenos resultados en la reducción de nutrientes, pero con el inconveniente del gran volumen requerido.
- El reactor A2/O es resultado de la secuencia de las zonas anaerobia, anóxica y óxica destinadas a la eliminación conjunta de nitrógeno y fósforo. Los procesos A2/O y Phoredox presentan tanto recirculación externa como interna. La recirculación externa se produce desde el decantador secundario a la primera cámara anaeróbica, con la finalidad de mantener una concentración de lodos adecuada en el reactor, mientras que la interna tiene lugar desde la salida de la cámara aerobia a la cámara anóxica.
- La tipología UCT o VIP vuelve a presentar recirculación interna y externa, con la salvedad de que la recirculación externa tiene como destino al tanque anóxico, en lugar de alcanzar la cámara anaerobia, descartando así la entrada de oxígeno disuelto y nitratos en esta etapa y mejorando las condiciones operacionales. Por otro lado, son necesarios dos flujos de recirculación interna, desde la zona aerobia a la anóxica y desde la anóxica a la anaerobia. El proceso UCT modificado se diferencia al dividir la zona anóxica en dos zonas. La primera de ellas, recibe la recirculación de los fangos del decantador y proporciona la

recirculación a la zona anaerobia previa. La segunda zona anóxica, recibe la recirculación de la zona aerobia, donde se acontece la desnitrificación.

La Figura 14 resume las configuraciones mencionadas con anterioridad, mostrando de manera esquematizada la ubicación relativa de cada una de las cámaras, así como el origen y destino de la recirculación.

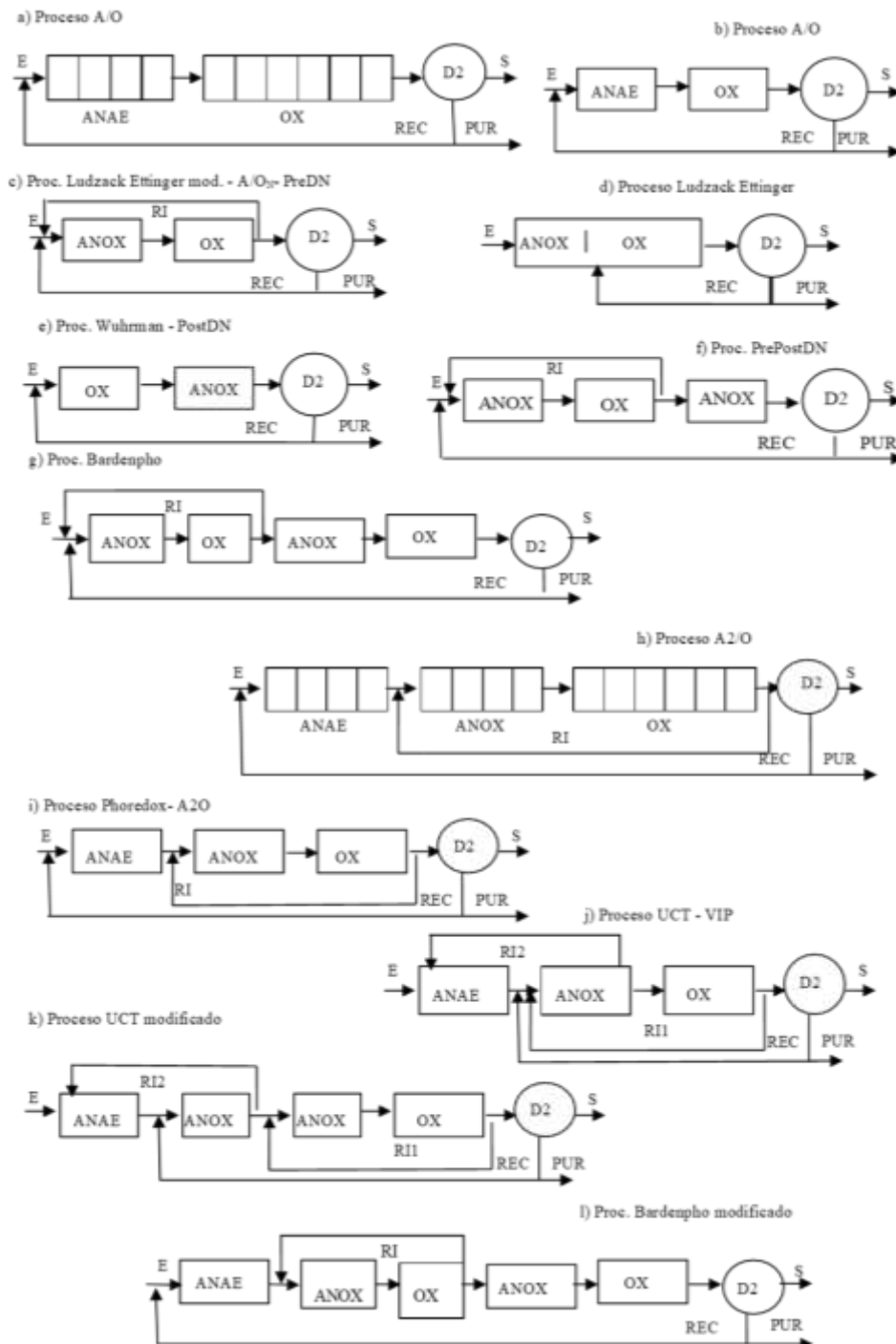


Figura 14. Configuración de los sistemas de procesos biológicos (Alasino, 2009).

## **4. DINÁMICA DE FLUIDOS COMPUTACIONAL**

---

La dinámica de fluidos computacional (Computational Fluid Dynamics, CFD) integra diversas disciplinas como mecánica de fluidos, matemáticas e informática. Constituye una de las metodologías empleadas en la resolución de problemas de Mecánica de Fluidos y, junto con los métodos experimentales y analíticos, conforman los tres enfoques básicos, guardando entre ellos una estrecha relación.

La dinámica de fluidos computacional es el arte de modelar los fluidos mediante métodos numéricos que resuelven los balances de masa, cantidad de movimiento y energía dentro de cualquier sistema que implique dinámica de fluidos, considerando la discretización de escalas espaciales y temporales (Versteeg & Malalasekera, 1995).

Los métodos numéricos aúnan modelos matemáticos que logran describir los fenómenos físicos sujetos a estudio. En el caso de la dinámica de fluidos, se emplean las ecuaciones de Navier-Stokes, ecuaciones diferenciales en derivadas parciales que precisan discretización espacial y temporal para su transformación en ecuaciones algebraicas, susceptibles de resolución computacional mediante algoritmos. El tratamiento adecuado de las propiedades del fluido y las condiciones de contorno del dominio fluido son indispensables, para el correcto funcionamiento de los códigos CFD, teniendo en cuenta el elevado coste computacional que conllevan las soluciones.

La discretización, pretende aproximar una variable continua en un número finito de puntos, dado que se trabaja con equipos finitos incapaces de operar ecuaciones diferenciales de variables continuas en espacio y tiempo.

### **4.1. Estructura de CFD**

Generalmente, la solución de un problema CFD implica la secuencia de tres etapas: pre-procesamiento, procesamiento y post-procesamiento.

Durante el pre-procesamiento se definen las características generales del problema, lo que precisa de un conocimiento previo y control adecuado del fenómeno, de modo que se garanticen la validez de los resultados.

El primer paso en cualquier análisis de CFD es la definición y creación de la geometría de la región de flujo, que es el dominio computacional para los cálculos de CFD. Posteriormente, se procede a la generación de una malla, dando lugar a la subdivisión del dominio en un número de subdominios más pequeños no superpuestos, para resolver la física del flujo dentro del dominio.

Seguidamente, se detallan las propiedades del fluido: densidad, viscosidad, propiedades térmicas, entre otras, y se seleccionan los modelos que intervienen en la física del problema: modelos de entrada de aire, de turbulencia, de partículas, de flujo bifásico, de transferencia de calor, de reacciones químicas, etc.

En último lugar, se han de imponer las condiciones de contorno para el problema de flujo, que controlan los valores de ciertas variables en los límites del dominio. Se deben asignar condiciones de contorno apropiadas para los límites de pared sólida estacionaria externa que limitan la geometría del flujo.

El procesamiento constituye la etapa principal, generando la solución numérica de las ecuaciones que gobiernan el flujo del fluido. Previo al proceso de solución, se han de establecer las condiciones iniciales, con implicación en la solución computacional, mediante la definición de los valores de determinadas variables que constituirán los puntos de partida para calcular las soluciones de los posteriores pasos temporales.

Se ha de comprobar la estabilidad del procedimiento numérico y garantizar la convergencia del proceso iterativo. La convergencia se puede evaluar en cada iteración por medio del análisis de los residuos del cálculo numérico, que reflejan la conservación de las propiedades del flujo.

El post-procesador permite analizar, visualizar y representar los resultados. Estos resultados coinciden con el valor de las variables en cada punto de la malla.

En la Figura 15 queda sintetizado el proceso descrito para plantear un problema, pudiendo distinguirse las tres etapas principales dentro del marco de análisis CFD.

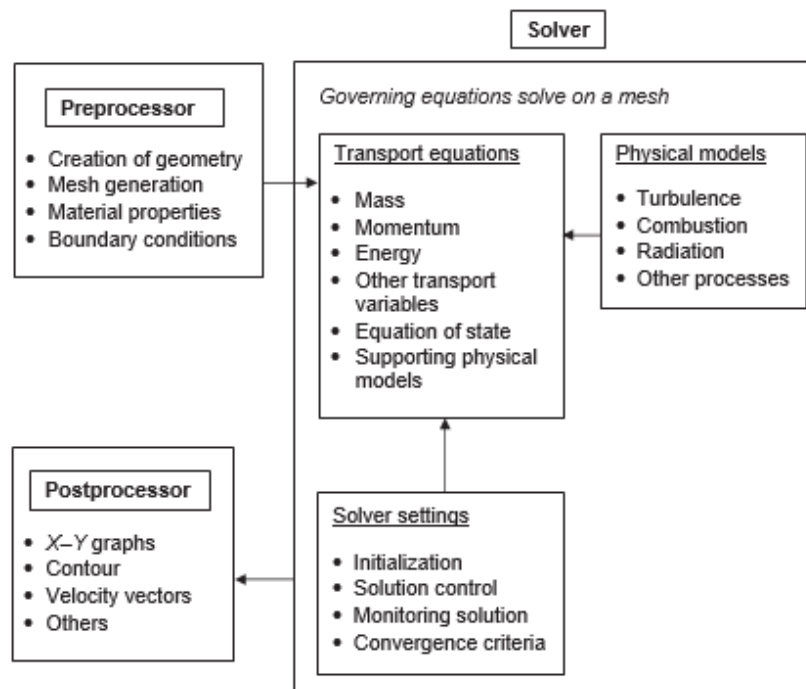


Figura 15. Etapas del planteamiento de un problema CFD (Tu et al., 2018).

## 4.2. Ecuaciones que gobiernan la dinámica de fluidos

Las leyes que describen la evolución de los flujos de fluidos, aplicables a un volumen fluido, están definidas por la conservación de las siguientes tres propiedades: masa, cantidad de movimiento y energía.

Las ecuaciones de la Mecánica de Fluidos vienen expresadas en su forma conservativa, cuya razón principal es debida al requisito de que, tras la discretización de las ecuaciones, las propiedades se conserven. Una simulación numérica en la que se perdiera alguna de estas propiedades debido a los métodos numéricos de resolución, sería poco representativa.

La ecuación para la conservación de la masa también se conoce como ecuación de continuidad, mientras que la ley de conservación de la cantidad de movimiento es la expresión de la ley de Newton generalizada, que define la ecuación de movimiento de un fluido. La ley de conservación de energía también se conoce como la expresión del primer principio de la termodinámica.

Cuando se aplica a un fluido viscoso, el conjunto de estas ecuaciones se conoce como ecuaciones de Navier-Stokes, mientras que se las conoce como ecuaciones de Euler cuando se aplica a un fluido ideal.

### 4.2.1. Ecuación de continuidad o de conservación de la masa

En un sistema cerrado la masa se debe conservar. Considerando un volumen de control donde se permite la transferencia de masa a través de la superficie de control, la conservación de la masa requiere que la tasa de cambio de masa dentro del volumen de control sea equivalente al flujo de masa que cruza la superficie del volumen.

El teorema del transporte de Reynolds, tiene por finalidad, relacionar la variación total de cualquier propiedad  $B$  de un sistema de control en el tiempo, con la variación respecto del tiempo de la propiedad  $B$  en el interior del volumen de control más el flujo neto de  $B$  a través de la superficie que lo encierra.

$$\frac{dB_{sist}}{dt} = \int_{V_c} \frac{\partial}{\partial t} (\rho b) dV + \int_{S_c} \rho b (\vec{v} \cdot \vec{n}) dA \quad (14)$$

donde  $b$  es igual a la propiedad  $B$  por unidad de masa.

Es por lo que, a partir del teorema de Reynolds, considerando como propiedad  $B$  la masa y sabiendo que ésta es constante, siendo su derivada respecto al tiempo cero, llegamos a la ecuación de continuidad:



$$\frac{dm_{sist}}{dt} = \frac{d}{dt} \int_{V_f(t)} \rho dV = \int_{V_f} \frac{\partial \rho}{\partial t} dV + \int_{S_f} \rho(\vec{v} \cdot \vec{n}) dA = 0 \quad (15)$$

donde  $S_f$  es la superficie del volumen fluido fijo  $V_f$ , y  $\vec{n}$  es el vector normal en dirección hacia afuera de la superficie.

La ecuación de continuidad puede ser expresada en forma diferencial mediante el empleo del teorema de divergencia o teorema de Gauss, el cual permite transformar una integral de volumen en una integral de área sobre la superficie que lo define:

$$\int_V \nabla \cdot \vec{G} dV = \oint_A \vec{G} \cdot \vec{n} dA \quad (16)$$

Aplicándolo a la ecuación de continuidad, nos queda:

$$\int_{V_c} \frac{\partial \rho}{\partial t} dV + \int_{S_c} \rho(\vec{v} \cdot \vec{n}) dA = \int_{V_c} \left[ \frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{v}) \right] dV = 0 \quad (17)$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{v}) = 0 \quad (18)$$

#### 4.2.2. Ecuación de conservación de la cantidad de movimiento

La ecuación principal que describe la dinámica de los fluidos deriva del principio físico enunciado por Newton, que establece que la variación de la cantidad de movimiento de un objeto se debe a las fuerzas que actúan sobre él.

$$\sum \vec{F} = m\vec{a} = m \frac{d\vec{v}}{dt} = \frac{d}{dt} (m\vec{v}) \quad (19)$$

donde  $m$  es la masa del cuerpo,  $\vec{a}$  el vector aceleración y  $\vec{v}$  el vector velocidad.

Aplicándolo a un volumen fluido  $V_f$ , sabiendo que  $\rho(\vec{x},t)\vec{v}(\vec{x},t)$  es la cantidad de movimiento por unidad de volumen de una partícula fluida situada en la posición  $\vec{x}$  en el instante  $t$ , se obtiene:

$$\frac{d}{dt} \int_{V_f(t)} \rho \vec{v} dV = \int_{V_f} \frac{\partial}{\partial t} (\rho \vec{v}) dV + \int_{S_f} \rho \vec{v} (\vec{v} \cdot \vec{n}) dS = \int_{V_f} \rho \vec{f}_m dV + \int_{S_f} \sigma \vec{n} dS \quad (20)$$

Que expresa que la variación de la cantidad de movimiento contenida en un volumen fluido  $V_f$ , junto con el flujo convectivo que tiene lugar a través de la superficie que lo envuelve, es igual a las fuerzas de superficie más las fuerzas másicas que actúan sobre el

volumen fluido. Siendo  $\vec{f}_m$  el vector de fuerzas másicas y  $\sigma$  el tensor de esfuerzos, que se puede descomponer en:

$$\sigma = -p\bar{I} + \bar{\tau} = 2\mu\bar{\epsilon} - \left(p + \frac{2}{3}\mu\nabla \cdot \vec{v}\right)\bar{I} \quad (21)$$

donde  $\bar{I}$  es el tensor unidad,  $\bar{\tau}$  el tensor de esfuerzos viscosos,  $\bar{\epsilon}$  el tensor de velocidad de deformación, y  $\mu$  el coeficiente de viscosidad dinámica.

En notación indicial la ecuación anterior queda:

$$\sigma_{ij} = 2\mu\epsilon_{ij} - \left(p + \frac{2}{3}\mu\nabla \cdot \vec{v}\right)\delta_{ij} \quad (22)$$

siendo  $\delta_{ij}$  la delta de Kronecker con valor 1 si  $i = j$  y 0 si  $i \neq j$ , además,  $\epsilon_{ij}$  es:

$$\epsilon_{ij} = \frac{1}{2}\left(\frac{\partial v_j}{\partial x_i} + \frac{\partial v_i}{\partial x_j}\right) \quad (23)$$

La forma diferencial de la ecuación de conservación de la cantidad de movimiento se expresa como:

$$\frac{\partial \rho \vec{v}}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{v} \vec{v}) = -\nabla p + \nabla \cdot \bar{\tau} + \rho \vec{f}_m \quad (24)$$

La expresión anterior puede descomponerse en:

$$\begin{aligned} \rho \left( \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} \right) &= \rho g_x - \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial z} \\ \rho \left( \frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} \right) &= \rho g_y - \frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial z} \\ \rho \left( \frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} \right) &= \rho g_z - \frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zz}}{\partial z} \end{aligned} \quad (25)$$

### 4.2.3. Ecuación de conservación de la energía

La primera ley de la termodinámica considera que la velocidad de incremento de la energía total, cinética e interna, contenida en un volumen fluido se debe al trabajo de las fuerzas de superficie y de las fuerzas másicas que actúan sobre él y al calor comunicado o generado (por reacción química, radiación, etc.) por unidad de tiempo. El principio de conservación de la energía aplicado a un volumen fluido  $V_f(t)$  da en forma integral:

$$\begin{aligned}
 \frac{d}{dt} \int_{V_f(t)} \rho \left( e + \frac{1}{2} v^2 \right) dV &= \int_{V_f} \frac{\partial}{\partial t} \left[ \rho \left( e + \frac{1}{2} v^2 \right) \right] dV + \int_{S_f} \rho \left( e + \frac{1}{2} v^2 \right) \vec{v} \cdot \vec{n} dS \\
 &= \int_{V_f} \rho \vec{f}_m \cdot \vec{v} dV + \int_{S_f} \vec{v} \cdot \sigma \cdot \vec{n} dS - \int_{S_f} \vec{q} \cdot \vec{n} dS + \int_{V_f} Q_r dV
 \end{aligned} \tag{26}$$

donde  $e$  y  $\frac{1}{2} v^2$  son las energías interna y cinética, respectivamente, por unidad de masa,  $\vec{f}_m$  son las fuerzas másicas por unidad de masa,  $\vec{q}$  es el flujo de calor transmitido por conducción y  $Q_r$  el calor aportado por unidad de tiempo y unidad de volumen al fluido por reacción química o radiación.

Aplicando el Teorema de Gauss a las integrales de superficie de la ecuación anterior, e igualando dichas integrales a cero, se alcanza la siguiente ecuación diferencial para la energía total:

$$\begin{aligned}
 \frac{\partial}{\partial t} \left[ \rho \left( e + \frac{1}{2} v^2 \right) \right] + \nabla \cdot \left[ \rho \left( e + \frac{1}{2} v^2 \right) \vec{v} \right] &= \rho \frac{D}{Dt} \left( e + \frac{1}{2} v^2 \right) \\
 &= \rho \vec{f}_m \cdot \vec{v} + \nabla \cdot (-p\vec{v}) + \nabla \cdot (\bar{\tau} \cdot \vec{v}) - \nabla \cdot \vec{q} + Q_r
 \end{aligned} \tag{27}$$

La ecuación de conservación de la energía puede reformularse aplicando la ley de conducción de calor de Fourier para relacionar el flujo de calor con el gradiente de temperatura:

$$\begin{aligned}
 \frac{\partial}{\partial t} \left[ \rho \left( e + \frac{1}{2} v^2 \right) \right] + \nabla \cdot \left[ \rho \left( e + \frac{1}{2} v^2 \right) \vec{v} \right] &= \frac{\partial}{\partial x} \left( k_t \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( k_t \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( k_t \frac{\partial T}{\partial z} \right) - \frac{\partial (up)}{\partial x} - \frac{\partial (vp)}{\partial y} \\
 &\quad - \frac{\partial (wp)}{\partial z} + \frac{\partial (u\tau_{xx})}{\partial x} + \frac{\partial (u\tau_{yx})}{\partial y} + \frac{\partial (u\tau_{zx})}{\partial z} + \frac{\partial (v\tau_{xy})}{\partial x} \\
 &\quad + \frac{\partial (v\tau_{yy})}{\partial y} + \frac{\partial (v\tau_{zy})}{\partial z} + \frac{\partial (w\tau_{xz})}{\partial x} + \frac{\partial (w\tau_{yz})}{\partial y} + \frac{\partial (w\tau_{zz})}{\partial z} \\
 &\quad + \rho \vec{f}_m \cdot \vec{v} + \rho (\dot{Q}_r + \dot{Q}_q)
 \end{aligned} \tag{28}$$

donde  $k_t$  es el coeficiente de conductividad térmica del fluido.  $\dot{Q}_r$  y  $\dot{Q}_q$  son las potencias caloríficas totales transmitidas por radiación y por reacción química sobre el volumen de control.

### 4.3. Discretización espacial

El principal paso para abordar un problema de dinámica de fluidos computacional reside en la discretización espacial mediante la generación de una malla numérica compuesta por subdominios denominados celdas. Con ello, se logra la representación discreta del dominio fluido y el cálculo de las variables en posiciones discretas.

La construcción de la malla es una ardua tarea, al tener que atender, en numerosas ocasiones, a las tres dimensiones espaciales, siendo función además de la geometría del dominio fluido, resultando difícil detectar a priori aquellas zonas que requieren un tamaño de malla inferior. Además, la calidad de la malla influye de manera directa en la convergencia y estabilidad de la simulación numérica y en la precisión de los resultados del cálculo. El diseño de la malla no es único, al carecer de un procedimiento automatizado, entrando en juego la experiencia y juicio crítico del usuario.

#### 4.3.1. Mallado del dominio fluido

Como se adelantaba anteriormente, la generación de la malla resulta una fase decisiva para alcanzar soluciones numéricas a las ecuaciones diferenciales que gobiernan el dominio de un problema CFD, debiendo ser lo suficientemente densa y fina para proporcionar una resolución adecuada de las características del flujo. Genera un impacto significativo sobre la velocidad de convergencia de la solución, la precisión de la misma y el tiempo de cálculo requerido.

La principal causa de los errores numéricos reside en la calidad de la malla, siendo conveniente reparar en aspectos relacionados con la forma de la celda: relación de aspecto, asimetría o sesgo y cambio de tamaño.

Podemos definir la relación de aspecto como el cociente entre el espaciado de la malla en la dirección  $x$  y en la dirección  $y$ , evitando, siempre que sea posible, grandes relaciones de aspecto, al desencadenar pérdidas de precisión de la solución. Lo ideal es una relación de aspecto igual a 1.

Del mismo modo, se debe asegurar una variación gradual del tamaño de las celdas en cualquier dirección, siendo preferible que el cambio de tamaño de un elemento a otro no supere el 20%. La relación entre caras de celdas adyacentes, conviene ser un múltiplo entero, guardando la alineación, con el fin de evitar difusiones de cantidad de movimiento que resulten artificiales.

El siguiente aspecto, relativo a la forma de la celda, trata la distorsión o asimetría de la cuadrícula, que se refiere al ángulo  $\theta$  indicado en la Figura 16. Normalmente, es deseable que las líneas de la cuadrícula se optimicen de tal manera que el ángulo  $\theta$  sea aproximadamente de  $90^\circ$ . Si el ángulo  $\theta < 45^\circ$  o  $\theta > 135^\circ$ , la malla contiene celdas

altamente sesgadas y a menudo exhibe un deterioro de los resultados computacionales o conduce a inestabilidades numéricas.

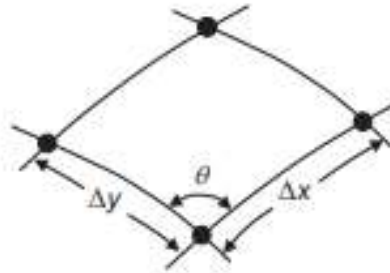


Figura 16. Ejemplo de celda con un espaciado  $\Delta x$  e  $\Delta y$ , así como un ángulo  $\theta$  entre las líneas que definen la cuadrícula (Tu et al., 2018)

Por otro lado, se ha de evitar disponer las condiciones de contorno de la malla en áreas con fuertes gradientes, debiéndose optar por distanciarlas de estas zonas, que requerirán de un refinamiento de la malla para mantener la precisión, al producirse grandes cambios en las propiedades del flujo.

Es habitualmente establecer una clasificación de la malla atendiendo a su conectividad, distinguiéndose entre:

- **Mallas estructuradas**

Las mallas estructuradas son la tipología más simple, estando constituidas por un conjunto de nodos identificados de forma inequívoca por los índices  $(i, j, k)$  en 3D o  $(i, j)$  en 2D, en coordenadas cartesianas. Cada nodo de la malla cuenta con 8 nodos a su alrededor en 2D y 26 en 3D, a los cuales se accede variando los índices en  $\pm 1$ . Se constituyen de elementos cuadriláteros en estudios bidimensionales o hexaedros en el caso tridimensional. La conectividad se produce de manera regular, lo que facilita la programación y simplifica la gestión de los datos. El mayor inconveniente se presenta por su dificultad en el tratamiento de geometrías complejas, reduciéndose su uso a geometrías simples.

A su vez, las mallas estructuradas se subdividen en tres categorías según la deformación aplicada a una malla cartesiana para su obtención: mallas tipo O, tipo C o tipo H. En una malla tipo O, los puntos se organizan generando una forma circular, pudiendo ser unidos por líneas cerradas. En las mallas tipo C, las líneas se doblan adquiriendo una forma en C. El resto de mallas se engloban dentro de la categoría tipo H.

Un caso especial es la malla estructurada multi-bloque, compuesta por una serie de bloques estructurados que se unen entre sí. Esta tipología de malla

resulta más flexible que las estructuradas, proporcionando mayor resolución en aquellas regiones complejas de flujo que lo exigen.

- **Mallas no estructuradas**

Las mallas no estructuradas ofrecen gran flexibilidad en el tratamiento de geometrías complejas, pudiendo adaptarse a las formas arbitrarias del dominio. Este tipo de malla puede ser empleado con los diferentes esquemas de discretización espacial, a pesar de ello, presentan mejor adaptación con métodos de volúmenes y elementos finitos. Se construyen a partir de formas triangulares en 2D y tetraédricas en 3D, siendo estos elementos generados de manera automática independientemente de la complejidad del dominio. Presenta mayores requisitos de almacenamiento que los mallados estructurados, ya que la conectividad entre elementos contiguos debe ser explícitamente almacenada.

- **Mallas híbridas**

Las mallas híbridas surgen de la combinación de las tipologías de malla expuestas anteriormente. Agrega diferentes tipos de elementos, triángulos o cuadriláteros en 2D y tetraedros, hexaedros o prismas en 3D. En estos casos, se ha de prestar atención al acoplamiento entre las diferentes mallas.

#### 4.3.2. Métodos de discretización espacial

Entre los principales métodos de discretización espacial destacan los métodos de diferencias finitas, volúmenes finitos y elementos finitos. La elección del esquema de discretización espacial es función del tipo de discretización de las ecuaciones.

Los métodos de diferencias finitas emplean la formulación diferencial de las ecuaciones. Al dominio se le superpone una malla estructurada con puntos denominados nodos, en los cuales las ecuaciones son aproximadas por la serie de Taylor, obteniéndose como resultado una ecuación algebraica por nodo que tiene por incógnita el valor de la variable en ese nodo y en nodos vecinos. No se asegura la conservación de momento y masa, y es compleja su aplicación a dominios de geometrías irregulares.

En los métodos de volúmenes finitos, el dominio de la solución se divide en un número finito de volúmenes de control contiguos, en los cuales se integran las ecuaciones diferenciales, dando como resultado una ecuación algebraica en cada volumen de control. En este caso, los nodos se alojan en el centroide del volumen y es necesaria su interpolación para expresar los valores de las variables en la superficie de dichos volúmenes. Se pueden emplear tanto en mallas estructuradas como no estructuradas.

En los métodos de elementos finitos, la ecuación diferencial se multiplica por unas funciones llamadas pesos antes de ser integrada. El dominio se divide en elementos, generalmente son triángulos o cuadriláteros en 2D, mientras que en 3D se emplean tetraedros o hexaedros. En cada uno de ellos, la solución se aproxima mediante una función lineal constituida a partir de sus valores en los vértices del elemento. Esta aproximación es sustituida en la ecuación integral pesada y se impone que la derivada de dicha integral con respecto al valor en cada nodo sea cero. El resultado es un conjunto de ecuaciones algebraicas no lineales. Son capaces de manejar geometrías arbitrarias, siendo ésta una de sus principales ventajas.

En el siguiente apartado se define más ampliamente el método de diferencias finitas, al ser el empleado en este Trabajo Fin de Grado.

#### 4.3.2.1. Método de Diferencias Finitas

El método de diferencias finitas es una aproximación para encontrar la solución numérica de las ecuaciones diferenciales, convirtiendo el problema de ecuaciones diferenciales en un problema algebraico resoluble por métodos matriciales. Es probablemente el método más simple de aplicar, pero requiere que la malla se configure de manera estructurada.

El método de diferencia finita (FDM) se basa en las propiedades del desarrollo de Taylor y en la aplicación directa de la definición de derivadas. Las derivadas de la ecuación diferencial se aproximan mediante truncamiento de las series de Taylor, considerando, por lo general, hasta el término de segundo orden, y despreciando aquellos de orden superior. Este truncamiento de la serie da lugar al error de truncamiento.

El desarrollo de  $u(x + \Delta x)$  alrededor  $u(x)$ , mediante la serie de Taylor expandida hacia adelante, se expresa como:

$$u(x + \Delta x) = u(x) + \Delta x \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\Delta x^2}{2} \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\Delta x^3}{3!} \frac{\partial^3 u}{\partial x^3} + \dots \quad (29)$$

de modo que, se obtiene la siguiente aproximación en diferencias finitas para la primera derivada, conocida como diferencia de primer orden hacia adelante para la primera derivada:

$$\begin{aligned} (u_x)_i &= \left( \frac{\partial u}{\partial x} \right)_i = \frac{u_{i+1} - u_i}{\Delta x} - \underbrace{\frac{\Delta x}{2} (u_{xx})_i - \frac{\Delta x^2}{6} (u_{xxx})_i + \dots}_{\text{error de truncamiento}} \\ &= \frac{u_{i+1} - u_i}{\Delta x} + O(\Delta x) \end{aligned} \quad (30)$$

mientras que la diferencia hacia atrás de primer orden para la derivada es:

$$\begin{aligned}
 (u_x)_i &= \left(\frac{\partial u}{\partial x}\right)_i = \frac{u_i - u_{i-1}}{\Delta x} + \underbrace{\frac{\Delta x}{2}(u_{xx})_i - \frac{\Delta x^2}{6}(u_{xxx})_i + \dots}_{\text{error de truncamiento}} \\
 &= \frac{u_i - u_{i-1}}{\Delta x} + O(\Delta x)
 \end{aligned} \tag{31}$$

siendo ambas, fórmulas de diferencia unilateral, ya que involucran puntos a un lado del punto  $i$  solamente.

Sumando las dos expresiones anteriores obtenemos una aproximación de segundo orden. La siguiente expresión, que involucra los puntos a la izquierda y a la derecha del punto  $i$ , constituye una fórmula de diferencia central:

$$(u_x)_i = \frac{u_{i+1} - u_{i-1}}{2\Delta x} - \frac{\Delta x^2}{6}(u_{xxx})_i + \dots = \frac{u_{i+1} - u_{i-1}}{2\Delta x} + O(\Delta x)^2 \tag{32}$$

Las aproximaciones de diferencias finitas de derivadas de orden superior se pueden obtener mediante aplicaciones repetidas de la fórmula de primer orden. Para el caso de diferencias centrales segundas se obtiene:

$$\begin{aligned}
 \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2}\right)_{i,j} &= \left(\frac{\partial}{\partial x} \left[\frac{\partial u}{\partial x}\right]\right)_{i,j} = \frac{\left(\frac{\partial u}{\partial x}\right)_{i+1,j} - \left(\frac{\partial u}{\partial x}\right)_{i,j}}{\Delta x} \\
 &= \frac{1}{\Delta x} \left[ \frac{u_{i+1,j} - u_{i,j}}{\Delta x} - \frac{u_{i,j} - u_{i-1,j}}{\Delta x} \right] \\
 &= \frac{u_{i+1,j} - 2u_{i,j} + u_{i-1,j}}{(\Delta x)^2} + O(\Delta x)^2
 \end{aligned} \tag{33}$$

#### 4.3.2.1.1. Error de truncamiento

El error de truncamiento es consecuencia directa de despreciar los términos de orden superior. Se entiende como la diferencia entre la ecuación discretizada y la ecuación diferencial original. Los errores para mallas uniformes son de la forma:

$$T_i = \sum_{l=m}^{\infty} A_l \frac{(\Delta x)^{l-n}}{l!} \left(\frac{\partial^l u}{\partial x^l}\right)_i \tag{34}$$

donde  $A_l$  son constantes que dependen del esquema y  $n$  se corresponde con la derivada aproximada  $\partial^n u / \partial x^n$ .



En muchas ocasiones, el objetivo no es conocer el valor absoluto del error sino más bien, cómo mejora la aproximación de la derivada al refinar la malla, es decir, al hacer  $\Delta x \rightarrow 0$ .

$$T_i \approx A_m \frac{(\Delta x)^{m-n}}{m!} \left( \frac{\partial^m u}{\partial x^m} \right)_i \quad (35)$$

donde  $m-n$  es el orden del esquema.

#### 4.3.2.1.2. Condiciones de frontera

En la condición de frontera tipo Dirichlet se especifica el valor que la función  $u(x,t)$  toma en la frontera, es decir, es un valor conocido en el nodo o nodos de la frontera.

En la condición de frontera tipo Neumann, lo que se conoce es la derivada de  $u(x,t)$  a lo largo de la frontera  $\partial\Omega$ , es decir,  $\partial u / \partial n$ .

### 4.4. Discretización temporal

El análisis de flujos no estacionarios precisa, además, de una discretización temporal, hallando la solución en puntos discretos del tiempo. El tiempo transcurrido entre dos instantes es lo que se conoce como paso de tiempo  $\Delta t$ , de cuyo valor dependerá la detección de cambios rápidos de comportamiento, con influencia en la precisión de la solución.

La discretización temporal se puede aplicar a problemas definidos por ecuaciones diferenciales ordinarias de primer orden en el tiempo, cuando se conocen las condiciones iniciales, lo que se denomina problemas de Cauchy y son de la forma:

$$\frac{du}{dt} = F(u, t) \quad (36)$$

$$u(t_0) = u_0 \quad (37)$$

donde  $t$  es la variable independiente,  $u$  y  $F$  vectores columna de dimensión  $s$ , y  $u_0$  la condición inicial. A pesar de no ser habitual encontrar derivadas de más de segundo orden en el tiempo, cualquier sistema se puede reducir a primer orden.

El objetivo de la discretización es transformar la ecuación diferencial en una ecuación algebraica, posibilitando su resolución computacional. Como resultado, se obtienen valores aproximados de  $u(t)$  en una serie discreta de puntos en el tiempo.

#### 4.4.1. Clasificación de esquemas numéricos

Los esquemas numéricos proporcionan aproximaciones numéricas de las ecuaciones diferenciales. Se establecen dos clasificaciones principales. La primera de ellas, considera el número de instantes de tiempo partícipes en la obtención de la solución en cada paso temporal, dando lugar a:

- **Esquema numérico unipaso**

Los esquemas unipaso se caracterizan por el empleo de un paso de tiempo anterior a  $t_{n+1}$ , representado por  $u^{n-l}$ , además del que se pretende calcular,  $u^{n+1}$ .

$$u^{n+1} = u^{n-l} + \Delta t H(u^{n+1}, u^{n-l}, t_{n+1}, t_{n-l}) \quad (38)$$

adquiriendo  $l$  un valor fijo, generalmente  $l = 0$  ó  $l = -1$ .  $H$  es una función que depende del esquema. Destaca el ahorro de memoria, al necesitar archivar la solución en un único instante anterior.

- **Esquema numérico multipaso**

En esta ocasión, la solución en un instante  $t_{n+1}$  requiere de  $p$  pasos anteriores  $t_{n-j+1}$  con  $j = 1, \dots, p$ . Se expresan como:

$$u^{n+1} = - \sum_{j=1}^p \alpha_j u^{n-j+1} + \Delta t H(u^{n+1}, \dots, u^{n-p+1}, t_{n+1}, \dots, t_{n-p+1}) \quad (39)$$

Por el contrario, tienen grandes requerimientos de memoria al necesitar almacenar los  $p$  instantes anteriores. Asimismo, precisan de  $p$  valores iniciales cuando en principio solo contamos con una condición inicial, por lo que se suelen emplear de forma escalonada comenzando con el uso de esquemas de menos pasos.

- **Esquema numérico multietapa**

Los esquemas numéricos multietapa alcanzan la solución iterativamente en varias etapas, empleando no solo los instantes  $t_n$  y  $t_{n+1}$ , sino además otros intermedios. Suelen ser unipaso, aunque también pueden ser multipaso, en cuyo caso no se requiere tanta memoria.

La segunda clasificación, sin embargo, es función del sistema de ecuaciones a resolver, pudiendo distinguir entre:

- **Esquemas numéricos explícitos**

Son aquellos en los que para calcular  $u^{n+1}$  se emplean valores conocidos en instantes anteriores  $u^{n-j+1}$  con  $j = 1, \dots, p$ .

$$u^{n+1} = - \sum_{j=1}^p \alpha_j u^{n-j+1} + \Delta t H(u^n, \dots, u^{n-p+1}, t_n, \dots, t_{n-p+1}) \quad (40)$$

Resultan sencillos de programar, al no resolver un sistema de ecuaciones algebraicas no lineal. La solución se obtiene directamente evaluando  $H(u^n, \dots, u^{n-p+1})$ , que no depende de  $u^{n+1}$ . Su principal desventaja es que son inestables para  $\Delta t$  grandes.

- **Esquemas numéricos implícitos**

Estos esquemas, hallan el valor de  $u^{n+1}$ , utilizando valores conocidos en instantes anteriores  $u^{n-j+1}$  con  $j = 1, \dots, p$ , además del propio valor  $u^{n+1}$ .

$$u^{n+1} = \sum_{j=1}^p \alpha_j u^{n-j+1} + \Delta t H(u^{n+1}, \dots, u^{n-p+1}, t_n, \dots, t_{n-p+1}) \quad (41)$$

Son complejos de programar, siendo costoso obtener la solución al necesitar resolver un sistema de ecuaciones algebraicas no lineales. A diferencia de los anteriores, entre sus principales ventajas encontramos su estabilidad para  $\Delta t$  grandes, lo que permite avanzar en la solución más rápidamente por paso.

## 4.5. Modelación de la turbulencia

### 4.5.1. Introducción

La gran diversidad de flujos con aplicación ingenieril, así como aquellos frecuentemente observados en la naturaleza son turbulentos, siendo el flujo laminar una excepción desarrollable únicamente ante condiciones de alta viscosidad, pequeñas velocidades o en dominios con dimensiones reducidas.

La clasificación de un flujo en laminar o turbulento es posible mediante el estudio del número de Reynolds, que relaciona las fuerzas inerciales con las fuerzas viscosas. Cuando el número de Reynolds de un flujo es suficientemente alto, se vuelve inestable ante pequeñas perturbaciones, cuya amplificación da lugar a un fenómeno conocido como turbulencia, caracterizada por rápidas variaciones tanto espaciales como temporales de las magnitudes fluidas.

Una de sus propiedades más atractiva es el incremento de la difusión efectiva de movimiento, masa y energía debido a las fluctuaciones del movimiento turbulento que tienden a homogeneizar la densidad, velocidad y temperatura en un campo fluido.

Estos flujos son siempre disipativos, lo que implica la necesidad de una aportación continua de energía para contrarrestar la disipación viscosa. La energía proviene de la energía cinética del movimiento turbulento y es invertida en aumentar la energía interna, mediante procesos de deformación, conocidos como estiramiento de vórtice a los que se ven sometidas las partículas fluidas. Sin esta aportación, las fluctuaciones turbulentas decaerían por viscosidad y el movimiento dejaría paulatinamente de ser turbulento.

Durante el estiramiento de vórtice se conserva el momento angular, y el trabajo de estiramiento realizado por el flujo medio en los remolinos grandes proporciona la energía que mantiene la turbulencia. Estos remolinos más grandes generan nuevas inestabilidades creando remolinos más pequeños que son transportados principalmente por vórtices.

La turbulencia es rotacional y tridimensional, caracterizada por manifestar elevadas fluctuaciones de la vorticidad, así como gran variedad de escalas, desde escalas muy grandes, compatibles con la escala del flujo, hasta las más pequeñas, de tamaño limitado por la naturaleza de los procesos disipativos.

La turbulencia es un fenómeno continuo, propiedad del flujo y no del fluido, gobernado por las ecuaciones de la mecánica de fluidos. Incluso las escalas más pequeñas que surgen en un flujo turbulento son considerablemente mayores que las escalas asociadas a los movimientos moleculares.

Este tipo de flujo se desarrolla para números de Reynolds elevados, y son consecuencia de inestabilidades en los flujos laminares, al producirse la interacción entre los términos viscoso e inercial no lineal de la ecuación de cantidad de movimiento, generando inestabilidades que originan un movimiento caótico, siendo inviable su tratamiento determinístico. La irregularidad y aleatoriedad de estos flujos justifica un tratamiento estadístico, al ser las ecuaciones de Navier-Stokes extremadamente sensibles a las condiciones iniciales, a lo que se añade la no linealidad de las ecuaciones.

El tratamiento estadístico clásico de la turbulencia caracteriza un flujo turbulento por los valores medios de las propiedades de flujo y su correspondiente propiedad de fluctuación estadística (Figura 17). Esta aportación vino de la mano de Reynolds, quien describió las ecuaciones en función de los términos medios de las magnitudes, aplicables al transporte de cualquier propiedad, incorporando términos adicionales como son el valor medio del producto de la velocidad de fluctuación turbulenta y de la oscilación turbulenta de la magnitud transportada.

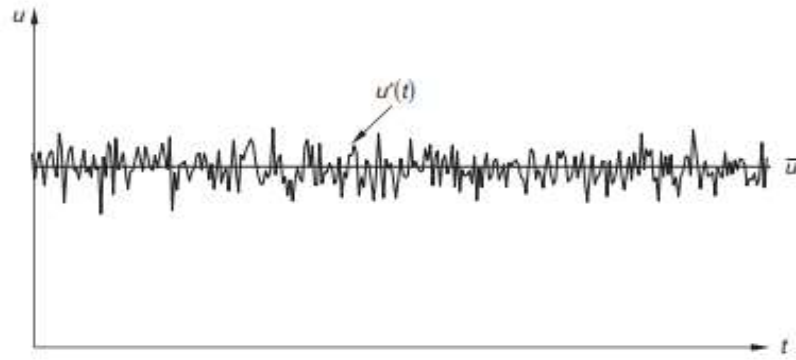


Figura 17. Fluctuación de la velocidad respecto al tiempo en un punto de un flujo turbulento (Tu et al., 2018)

#### 4.5.2. Cascada de energía de Kolmogorov

La teoría de la cascada de energía explica la transferencia y el reparto de energía entre las diferentes escalas de remolinos. Los remolinos grandes adquieren la energía cinética turbulenta del flujo medio principal y la transfieren a remolinos cada vez más pequeños, hasta que las fuerzas viscosas la disipan cuando el remolino alcanza un tamaño mínimo, que se conoce como microescala de Kolmogorov.

A causa de la interacción de los remolinos de gran tamaño con el flujo medio, las grandes escalas presentan gran dependencia de las condiciones iniciales y de contorno, lo que determina su marcado carácter anisótropo. El número de Reynolds asociado es elevado y el flujo se puede considerar ideal, no existiendo disipación viscosa a esta escala, por lo que el proceso de transferencia continúa hasta que la escala es tan pequeña que los términos viscosos disipan su energía. La escala de los remolinos más pequeños, función del valor de la viscosidad, lleva asociada por el contrario un número de Reynolds de orden unidad y el proceso disipativo es considerado isótropo.

La Teoría del Equilibrio Universal de Kolmogorov (1941) postula que la escala más pequeña ha de ser universal, no dependiendo de los grandes remolinos ni del movimiento medio del flujo turbulento, siendo función, exclusivamente, de la viscosidad cinemática ( $\nu$ ) y de la velocidad de transferencia de energía desde las grandes escalas a la escala pequeña ( $\epsilon$ ), que se corresponde con la velocidad a la que se disipa la energía en la escala pequeña, transformándose en calor.

Se pueden estimar las escalas de Kolmogorov espaciales ( $l$ ), temporales ( $\tau$ ) y de velocidad ( $v$ ), que actúan como sumideros de energía en función de:

$$l = (\nu^3/\epsilon)^{1/4}, \tau = (\nu/\epsilon)^{1/2}, v = (\nu\epsilon)^{1/4} \quad (42)$$

### 4.5.3. Modelos numéricos de simulación de flujos turbulentos

La resolución numérica directa de las ecuaciones de Navier-Stokes DNS (Direct Numerical Simulation) es un método de simulación en CFD que resuelve todas las escalas espaciales y temporales del flujo turbulento sin promediados o aproximaciones, ofreciendo soluciones altamente fiables y exactas, al reducirse los errores a aquellos procedentes de las discretizaciones numéricas. Su extremado coste computacional, dado el tamaño reducido de las celdas requerido para la solución de los remolinos en todas las escalas y su limitación en el número de Reynolds, lo hace poco atractivo en la práctica ingenieril.

La solución a las limitaciones del DNS, con el aumento del número de Reynolds, se consigue al reducir el rango de escalas que se resuelven en la cuadrícula numérica, centrándose únicamente en la resolución de la macroescala, mucho más energética y efectiva en el transporte. Dado el carácter universal de la microescala, se recurre a un modelo capaz de considerar aproximadamente su influencia en la variación general de los parámetros del flujo. Esta separación de escalas es posible aplicando un filtro espacial al campo de velocidad, de modo que todas las variables de las ecuaciones se reemplazan por la suma de una componente media (filtrada) y otra fluctuante. Este enfoque se conoce como Simulación de Grandes Remolinos (Large Eddy Simulation, LES).

Los métodos que emplean el promediado de Reynolds de las ecuaciones de Navier-Stokes (Reynolds-Averaged Navier-Stokes, RANS) tienen como objetivo la descripción estadística del flujo. El tiempo promedio es mucho mayor que la escala de tiempo más grande de las fluctuaciones turbulentas, por lo que las ecuaciones de conservación describen únicamente la evolución de las cantidades de flujo medio. Según la descomposición de Reynolds, todas las magnitudes se sustituyen por la suma de su valor medio y una componente fluctuacional. La influencia de las fluctuaciones de turbulencia eliminadas en el flujo medio se incorpora al tensor de tensión de Reynolds.

De este modo, todo valor instantáneo de una variable  $\phi$  se puede descomponer como la suma de su valor medio  $\bar{\phi}$  y la fluctuación respecto a él  $\phi'$  como:

$$\phi(\vec{x}, t) = \bar{\phi}(\vec{x}, t) + \phi'(\vec{x}, t) \quad (43)$$

Teniendo en cuenta que el valor medio de las fluctuaciones es cero, la componente media viene dada por:

$$\bar{\phi} = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} \phi dt \quad (44)$$

La incorporación de la aportación de Reynolds en las ecuaciones de Navier-Stokes, resulta en las ecuaciones Navier-Stokes promediadas de Reynolds:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_j) = 0 \quad (45)$$

$$\frac{\partial \rho u_i}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_i u_j) = - \frac{\partial \rho u_i}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\tau_{ij} - \rho \overline{u_i' u_j'}) + S_M \quad (46)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \rho h_{tot}}{\partial t} - \frac{\partial p}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_j h_{tot}) \\ = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial x_j} - \rho \overline{u_j' h} \right) + \frac{\partial}{\partial x_j} [u_i (\tau_{ij} - \rho \overline{u_i' u_j'})] + S_E \end{aligned} \quad (47)$$

donde  $\tau$  simboliza el tensor de esfuerzos viscosos incorporando la componente normal y las tensiones de corte.  $S_M$  y  $S_E$  son los términos fuente de las ecuaciones de cantidad de movimiento y energía, respectivamente.

El término adicional que figura en la ecuación de cantidad de movimiento es un tensor simétrico conocido como tensor de esfuerzos de Reynolds ( $\rho \overline{u_i' u_j'}$ ), originado por la transferencia de momento a partir del campo fluctuante de las velocidades.

Del mismo modo, para la ecuación de la energía tenemos un nuevo término turbulento ( $\rho \overline{u_j' h}$ ), mientras que el término  $\frac{\partial}{\partial x_j} [u_i (\tau_{ij} - \rho \overline{u_i' u_j'})]$  representa el trabajo viscoso. La energía total media del fluido por unidad de masa se obtiene como:

$$h_{tot} = h_{stat} + \frac{1}{2} UU + k \quad (48)$$

donde  $h_{stat}$  es la entalpía estática o cantidad de energía que un sistema puede intercambiar con su entorno y  $U$  es el vector velocidad.

El tensor de Reynolds permite definir la energía cinética turbulenta  $k$ , considerada un medio de dicho tensor de esfuerzos turbulentos o tensor de Reynolds:

$$k = \frac{1}{2} (\overline{u'u' + v'v'}) = \frac{1}{2} \overline{u_i' u_i'} \quad (49)$$

Esto desemboca en un sistema con más incógnitas que ecuaciones surgiendo lo que se conoce como problema de cierre de la turbulencia, siendo necesarias ecuaciones

complementarias para la resolución. Las primeras hipótesis de cierre fueron (Kaiser & Zamora, 2007):

- Coeficiente de viscosidad turbulenta de Boussinesq (1877). Pretende expresar los esfuerzos, por analogía con los viscosos, mediante el empleo de una viscosidad turbulenta.

$$\tau_{ij} = -\rho \overline{u_i' u_j'} = \mu_t \left( \frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) \quad (50)$$

- Longitud de mezcla de Prandtl (1925). Define la longitud de mezcla como el recorrido medio que hacen las partículas del flujo cuando transportan una determinada cantidad.
- Hipótesis de Von Kármán (1930). Parte de la idea de la invarianza local; en todos los puntos del flujo turbulento el mecanismo de turbulencia es el mismo y sólo se caracteriza por las escalas de longitud y tiempo.

Un modelo de turbulencia hace referencia a un procedimiento de cálculo para el cierre del sistema de ecuaciones promediadas. En la mayoría de los modelos RANS (Reynolds-Averaged Navier-Stokes) se incorpora la energía cinética turbulenta ( $k$ ) y la disipación de energía cinética turbulenta ( $\varepsilon$ ) como base para la simulación de las incógnitas presentadas. Se pueden clasificar en: modelos de viscosidad turbulenta (Eddy Viscosity Models, EVM) y modelos de esfuerzos cortantes de Reynolds (Reynolds Stress Models, RSM). Dentro de la categoría EVM se distinguen modelos de cero, una y dos ecuaciones, lo que hace referencia al número de ecuaciones adicionales para cerrar el problema de turbulencia.

#### 4.5.3.1. Modelo de dos ecuaciones: $k$ -épsilon

Constituye el modelo más utilizado en la práctica ingenieril, válido para flujos totalmente turbulentos, con alto número de Reynolds, por lo que no son aplicables en regiones como la zona de pared dentro de la capa límite. Incorpora dos ecuaciones de balance en las que se interrelacionan la energía cinética turbulenta del fluido  $k$  y su velocidad de disipación  $\varepsilon$ , posibilitando el cálculo de la viscosidad turbulenta  $\mu_t$ .

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (51)$$

Los valores de  $k$  y  $\varepsilon$  se determinan a partir de las ecuaciones de transporte:



$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j k) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + P_k - \rho \varepsilon + P_{kb} \quad (52)$$

$$\frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j \varepsilon) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + \frac{\varepsilon}{k} (C_{1\varepsilon} P_k - C_{2\varepsilon} \rho \varepsilon + C_{1\varepsilon} P_{\varepsilon b}) \quad (53)$$

donde  $P_k$  es la producción turbulenta debido a las fuerzas viscosas, mientras que  $P_{kb}$  y  $P_{\varepsilon b}$  representan la influencia de las fuerzas de gravedad. Los valores de las constantes empíricas (Launder & Spalding, 1974) son:

$$C_\mu = 0.09, \quad C_{1\varepsilon} = 1.44, \quad C_{2\varepsilon} = 1.92, \quad \sigma_k = 1, \quad \sigma_\varepsilon = 1.3$$

El significado físico de las ecuaciones anteriores es la tasa de cambio y el transporte convectivo de  $k$  o  $\varepsilon$  es igual al transporte difusivo combinado con la tasa de producción y disipación de  $k$  o  $\varepsilon$  (Versteeg & Malalasekera, 2007).

$$\begin{aligned} & \left[ \text{Velocidad de cambio de } k/\varepsilon \right] + \left[ \text{Transporte por convección de } k/\varepsilon \right] \\ & = \left[ \text{Transporte por difusión de } k/\varepsilon \right] + \left[ \text{Producción de } k/\varepsilon \right] - \left[ \text{Disipación de } k/\varepsilon \right] \end{aligned} \quad (54)$$

#### 4.5.3.2. Modelo de dos ecuaciones: RNG $k$ - $\varepsilon$

El modelo RNG  $k$ - $\varepsilon$  (Renormalization-Group, RNG) descende de una técnica estadística llamada teoría del grupo de renormalización. Este modelo considera términos adicionales en la expresión de  $\varepsilon$ , que en teoría acrecientan la exactitud ante flujos rápidamente deformados. Se incluye el efecto de los flujos rotacionales en la turbulencia. El RNG proporciona una formula diferencial para la viscosidad efectiva, que contempla los efectos para flujos con números de Reynolds inferiores (Granell, 2014).

Las ecuaciones de transporte para la generación de turbulencia y disipación son las mismas que las empleadas por el modelo  $k$ - $\varepsilon$  estándar, pero las constantes del modelo difieren.

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j k) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_{kRNG}} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + P_k - \rho \varepsilon + P_{kb} \quad (55)$$

$$\begin{aligned}
 \frac{\partial(\rho\varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j \varepsilon) \\
 = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_{\varepsilon RNG}} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + \frac{\varepsilon}{k} (C_{1\varepsilon RNG} P_k - C_{2\varepsilon RNG} \rho \varepsilon \\
 + C_{1\varepsilon RNG} P_{\varepsilon b})
 \end{aligned} \tag{56}$$

siendo

$$C_{1\varepsilon RNG} = 1.42 - f_\eta \tag{57}$$

$$f_\eta = \frac{\eta(1 - \frac{\eta}{4.38})}{(1 + \beta_{RNG} \eta^3)} \tag{58}$$

$$\eta = \sqrt{\frac{P_k}{\rho C_{\mu RNG} \varepsilon}} \tag{59}$$

Las constantes adquieren los siguientes valores:

$$\beta_{RNG} = 0.012, C_{\mu RNG} = 0.085, C_{2\varepsilon RNG} = 1.68, \sigma_{kRNG} = 0.7179, \sigma_{\varepsilon RNG} = 0.7179$$

#### 4.5.3.3. Modelo de dos ecuaciones: *k-omega*

Emplea dos ecuaciones que intervienen en el cálculo posterior de  $\mu_t$ . En este caso, se incorporan ecuaciones de transporte para la energía cinética turbulenta del fluido  $k$  y la frecuencia turbulenta  $\omega$ . En teoría, este modelo presenta una mejor adaptación en caso de flujos transitorios o con gradientes de presión negativos.

$$\mu_t = \rho \frac{k}{\omega} \tag{60}$$

La ecuación de  $k$  es:

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j k) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + P_k - \beta' \rho k \omega + P_{kb} \tag{61}$$

Y la ecuación para  $\omega$ :

$$\frac{\partial(\rho\omega)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j \omega) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\omega} \right) \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right] + \alpha \frac{\omega}{k} P_k - \beta \rho k \omega^2 + P_{\omega b} \quad (62)$$

Las constantes del modelo toman los siguientes valores:

$$\beta' = 0.09, \quad \alpha = 5/9, \quad \beta = 0.075, \quad \sigma_k = 2, \quad \sigma_\omega = 2$$

#### 4.5.3.4. Modelo de dos ecuaciones: *Shear Stress Transport (SST)*

El modelo de transporte de tensiones de corte turbulentas (SST) es una variación del modelo original  $k$ - $\omega$ , teóricamente más preciso y fiable para una mayor tipología de flujos incluso ante gradientes de presión adversos. Combina los modelos  $k$ - $\omega$  y  $k$ - $\varepsilon$ , de modo que, en el interior de la capa límite, donde dominan los efectos viscosos y el número de Reynolds es bajo, se emplea la formulación del modelo  $k$ - $\omega$ , mientras que, en el borde exterior de la capa límite utiliza la formulación del modelo  $k$ - $\varepsilon$ .

Asimismo, modifica la formulación de la viscosidad turbulenta, incorporando los efectos de transporte de los principales esfuerzos cortantes turbulentos e incluye un término de difusión cruzada en la ecuación  $\omega$  y en la función de mezcla, para asegurar un comportamiento adecuado del modelo tanto en las proximidades de la capa límite como lejos de esta (Granel, 2014).

La expresión para el cálculo de la viscosidad turbulenta es:

$$\mu_t = \rho \frac{a_1 k}{\max(a_1 \omega, S F_2)} \quad (63)$$

siendo  $S$  es la magnitud característica del promedio de gradientes de velocidad y  $F_2$  una función de mezcla.

Las ecuaciones de transporte para el modelo SST vienen dadas por:

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j k) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_{k3}} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + P_k - \beta' \rho k \omega + P_{kb} \quad (64)$$

$$\begin{aligned}
 & \frac{\partial(\rho\omega)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j \omega) \\
 &= \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_{\omega 3}} \right) \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right] + (1 - F_1) 2\rho \frac{1}{\sigma_{\omega 2} \omega} \frac{\partial k}{\partial x_j} \frac{\partial \omega}{\partial x_j} + \alpha_3 \frac{\omega}{k} P_k \\
 & \quad - \beta_3 \rho \omega^2 + P_{\omega b}
 \end{aligned} \tag{65}$$

#### 4.5.3.5. Modelo de Esfuerzos Cortantes de Reynolds (RSM)

Los RSM modelizan cada componente del tensor de Reynolds empleando una ecuación de transporte. Se basan además en una ecuación adicional para la disipación de la energía turbulenta cinética. Es por ello que, generalmente se mejora la descripción de los flujos anisotrópicos, cuando la hipótesis de viscosidad de remolino no es válida.

La ecuación de transporte para los esfuerzos de Reynolds puede escribirse de la siguiente manera:

$$\begin{aligned}
 & \underbrace{\frac{\partial(\rho \overline{u_i' u_j'})}{\partial t}}_{\text{Derivada temporal local}} + \underbrace{\frac{\partial(\rho u_k \overline{u_i' u_j'})}{\partial x_k}}_{C_{ij} \equiv \text{convección}} \\
 &= - \underbrace{\frac{\partial}{\partial x_k} [\rho \overline{u_i' u_j' u_k'} + p(\delta_{kj} \overline{u_i'} + \delta_{ik} \overline{u_j'})]}_{D_{T,ij} \equiv \text{Difusión turbulenta}} \\
 & \quad + \underbrace{\frac{\partial}{\partial x_k} \left[ \mu \frac{\partial(\overline{u_i' u_j'})}{\partial x_k} \right]}_{D_{L,ij} \equiv \text{Difusión molecular}} - \underbrace{\rho \left( \overline{u_i' u_k'} \frac{\partial u_j}{\partial x_k} + \overline{u_j' u_k'} \frac{\partial u_i}{\partial x_k} \right)}_{P_{ij} \equiv \text{Producción de esfuerzos}} \\
 & \quad + \underbrace{p \left( \frac{\partial u_i'}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j'}{\partial x_i} \right)}_{\Phi_{ij} \equiv \text{Presión de deformación}} - \underbrace{2\mu \frac{\partial u_i'}{\partial x_k} \frac{\partial u_j'}{\partial x_k}}_{\varepsilon_{ij} \equiv \text{Disipación}} \\
 & \quad - \underbrace{2p\Omega_k (\overline{u_j' u_m'} \varepsilon_{ikm} + \overline{u_i' u_m'} \varepsilon_{jkm})}_{F_{ij} \equiv \text{Producción del sistema rotacional}}
 \end{aligned} \tag{66}$$

#### 4.6. Aportaciones de la dinámica de fluidos computacional en las EDARs

El aumento de la capacidad de los procesadores y algoritmos desarrollados, han ampliado notablemente los campos de aplicación y usos de las simulaciones, alcanzando especial interés en el tratamiento de aguas residuales. Muestra de ello se recoge en la Figura 18, quedando constatado el aumento del número de publicaciones relacionadas con la aplicación de CFD en el sector del agua residual.

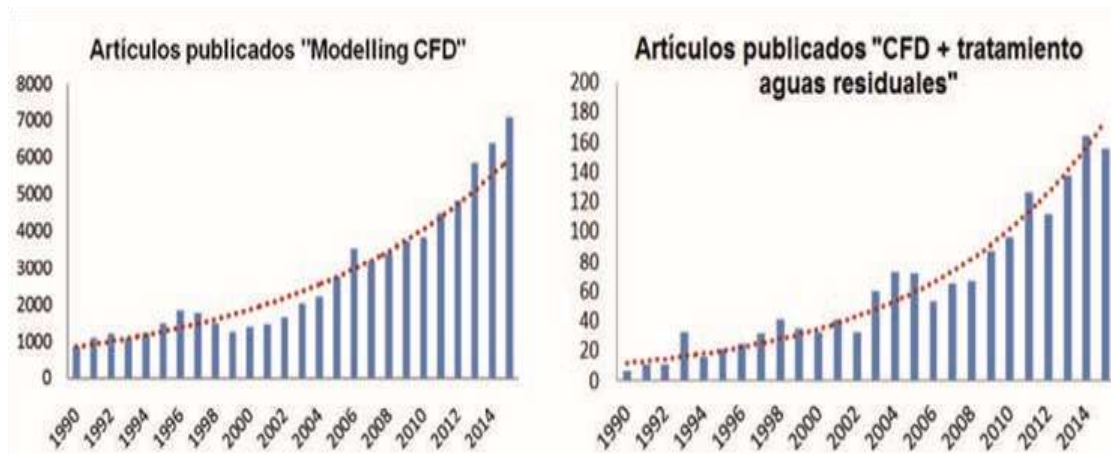


Figura 18. Estudios publicados sobre CFD (Chiva et al., 2018).

Hay consenso unánime entre la pluralidad de autores respecto a la necesidad de validación de los modelos CFD con datos experimentales para garantizar la fiabilidad de los resultados obtenidos. Karpinska & Bridgeman (2016) consideran el empleo de CFD como una herramienta poderosa y necesaria para la optimización de los sistemas de tratamiento de aguas.

Con el aumento en el uso de CFD en este campo, se realizaron dos estudios (Laurent et al., 2014; Wicklein et al., 2016) para establecer protocolos de buenas prácticas de modelado y asegurar el uso adecuado de esta técnica para el modelado de aguas residuales. A pesar de ello, existen cuantiosos desafíos que incluyen la hidráulica turbulenta, el fluido multifásico para optimizar la aireación y calcular la sedimentación de los flóculos y la biocinética mediante la aplicación de modelos CFD-ASM (Samstag et al., 2016; Karpinska & Bridgeman, 2016).

Los trabajos acometidos hasta entonces evidencian la influencia de la geometría de los reactores biológicos en el patrón de flujo, motivo por el cual la modelación hidrodinámica ha ganado relevancia en la optimización de diseños, a fin de suprimir

defectos en el comportamiento del flujo, con el consiguiente ahorro en la construcción de prototipos.

Las herramientas CFD se han aplicado recientemente en la evaluación de las diversas configuraciones de reactores biológicos, incluyendo tecnologías en desarrollo, proporcionando un soporte indispensable para comprender los fenómenos de transporte y eficiencia de la mezcla, en función de la ubicación y rendimiento de elementos internos como agitadores y difusores, permitiendo identificar las zonas o volúmenes muertos, y estudiar la optimización de la transferencia de oxígeno en sistemas de fangos activos.

A principios del año 2000, el CFD surge como una herramienta auxiliar y ampliamente empleada para simular y modelizar la mezcla de digestores anaerobios. Por ejemplo, Coughtrie et al. (2013) desarrollaron simulaciones CFD para el análisis de los patrones de flujo en un biodigestor anaeróbico cilíndrico, contrastando con datos experimentales para validar los resultados obtenidos por Karim et al. (2004), y usando Rastreo Automatizado de Partículas Radioactivas por Ordenador (CARPT). Siguiendo con esta línea, otros grupos de investigación (Terashima et al., 2009; Yu et al., 2011; Bridgeman, 2012; Wu, 2012; Craig et al., 2013) han realizado simulaciones CFD para cuantificar los efectos de la mezcla, principalmente en geometrías cilíndricas, con dispositivos de recirculación como tubos de aspiración, gas a presión y bombeo de lodos.

Por su parte Vesvikar & Al-Dahhan (2005) publicaron un trabajo donde se analizó la agitación con gas en un digestor a escala laboratorio, caracterizado por Karim et al. (2004), simulando la contribución en la agitación que tenía la inyección de gas en el interior de una estructura tubular, a cuya geometría se prestó especial atención por su influencia sobre el campo de velocidades del líquido. Wu (2010) prosiguió con el análisis de este mismo sistema, efectuando un estudio comparativo de la agitación mecánica en diferentes configuraciones. Trabajos posteriores (Wu, 2014), evaluaron la agitación mediante gas, a través de la velocidad media y el índice de uniformidad de la velocidad. Dichos estudios le permitieron completar su investigación, declarando que la agitación por aireación promovía un mejor mezclado. El autor realizó diversos estudios extendiendo el modelo a las fases líquidas no newtonianas, comparando la influencia que un amplio conjunto de modelos de turbulencia e integrando la dinámica de fluidos con un modelo bioquímico.

Yu et al. (2013) desarrollaron un modelo euleriano multifásico de un reactor de 70 litros, e implementaron un modelo específico para la simulación del movimiento de la fase sólida (Kinetic Theory of Granular Flow, KTGF), con el propósito de proporcionar una mejor comprensión del impacto que la suspensión y la sedimentación tienen sobre la retención de partículas de biomasa en los digestores anaeróbicos.

Azargoshasb et al. (2015) simularon un modelo euleriano multifase mediante CFD de un digestor de 2 litros agitado de manera continua, incluyendo en el modelo ecuaciones de balance de población de bacterias acetogénicas y metanogénicas.

Dapelo et al. (2015) desarrollaron un modelo CFD basado en el volumen finito de Euler-Lagrange para simular un digestor anaerobio mezclado con gas a presión. El biogás recogido en la parte superior del reactor se bombeaba al lodo a través de una boquilla ubicada en el fondo del reactor, promoviendo el movimiento del fluido debido al intercambio de momento entre las burbujas y la fase líquida. No se incluyeron efectos de ruptura y coalescencia de las burbujas de gas.

Hurtado et al. (2015) desarrollaron un modelo CFD de un reactor de tanque agitado continuo (CSTR), por recirculación de material de la EDAR de Alcantarilla (Murcia). Para validar el modelo experimentalmente, introdujeron partículas en el sistema y midieron su concentración en la línea de salida a lo largo del tiempo.

Por otro lado, se ha investigado la hidrodinámica de gran variedad de configuraciones de lodos activados mediante CFD con el propósito de hallar el rendimiento de la mezcla mediante el análisis del campo de velocidad y la distribución del tiempo de residencia, y desde el punto de vista de la eficiencia de la aireación.

Ratkovich & Bentzen (2013) presentaron el estudio de cuatro configuraciones de biorreactores de membrana al incidir la hidrodinámica sobre el ensuciamiento. Buscaron identificar la velocidad óptima del flujo cruzado, escenarios factibles para los difusores de aire y configuraciones de los módulos de membrana, que optimizaran la magnitud y distribución del esfuerzo cortante, permitiendo un mejor control sobre el ensuciamiento.

Lei & Ni (2014) elaboraron un modelo tridimensional del flujo trifásico de un canal de oxidación para simular la hidrodinámica, transferencia de oxígeno, oxidación de carbono y el proceso de nitrificación-desnitrificación, describiendo la interacción entre las distintas fases.

El efecto de los sólidos a menudo no es considerado en los modelos de reactores biológicos. Un modelo convencional contempla los sólidos presentes en el licor mezcla suponiendo que están incluidos en la fase líquida, al poseer una densidad de líquido similar (Lei & Ni, 2014). Por lo tanto, el enfoque de fluidos no newtonianos se suele simular considerando la presencia de los sólidos a través de la viscosidad del líquido (Ratkovich et al., 2013).

Karpinska & Bridgeman (2016) efectuaron una revisión de los principales trabajos sobre el uso de CFD para modelar la aireación, aumentando la eficiencia del proceso y disminuyendo el aporte de energía, evaluando la mezcla y la transferencia de masa junto con la biocinética. Describen varios enfoques monofásicos y multifásicos, y métodos de acoplamiento de los datos de CFD con la biocinética, teniendo en cuenta el campo de

flujo real y su impacto en la transferencia de masa de oxígeno y el rendimiento de los procesos biológicos que tienen lugar en los tanques de aireación.

La velocidad de transferencia de oxígeno en los tanques de aireación se rige por varios parámetros hidrodinámicos como el tamaño de la burbuja, la velocidad y la turbulencia de la fase líquida. Todo ello, fue estudiado a escala de laboratorio por Karpinska y Bridgeman (2017), incluyendo la ruptura y la fusión de burbujas.

Karpinska y Bridgeman (2018) elaboran un modelo euleriano de dos fluidos de un canal de oxidación a gran escala, incorporando un modelo de turbulencia SST  $k-\omega$  y modelos de interacción de burbujas para simular el rendimiento real del tanque de aireación, identificándose los problemas de rendimiento del proceso resultantes de los parámetros de diseño y las condiciones de funcionamiento. Se pudo comprobar que los valores de diseño de las tasas de flujo de aire conducían a un deterioro de las condiciones de mezcla y a la generación de regiones no aireadas. La influencia de la mezcla inducida por la aireación en el rendimiento del reactor se evaluó mediante la distribución del tiempo de residencia del fluido. Otros autores han desarrollado modelos CFD de enfoque euleriano gas-líquido de canales de oxidación a gran escala (Cockx et al., 2001; Yang et al., 2011).

Por lo general, los estudios realizados a escala de laboratorio permiten efectuar ensayos y mediciones con las que validar los resultados desprendidos del modelo CFD. Los investigadores han aplicado diferentes técnicas de validación como: el consumo energético (Bridgeman, 2012), partículas radioactivas (Karim et al., 2004; Vesvikar y Al-Dahhan, 2005; Wu, 2012), medidores de velocidad ultrasónicos de efecto Doppler (Wu, 2012), velocimetría de imágenes de partículas (Dapelo et al, 2015), basándose en la bibliografía existente (Karim et al.,2007; Wu, 2010).

La dificultad se presenta cuando la modelización del tanque se realiza a gran escala, dada la complejidad que conlleva la obtención de datos empíricos con los que caracterizar el campo de velocidades. El comportamiento de los fluidos se puede conocer mediante pruebas de trazadores o utilizando instrumentación específica para efectuar mediciones locales, requeridas para calibrar los modelos de CFD (Brannock et al., 2010; Wicklein et al., 2016).



## 5. MODELO NUMÉRICO FLOW-3D

---

FLOW-3D es un software CFD basado en un esquema de diferencias finitas, que surge en 1980 comercializado por la compañía Flow Science. Se emplea en múltiples aplicaciones de ingeniería hidráulica, marítima, aeroespacial, incluyendo problemas de flujo en lámina libre, arrastre y depósito de sedimentos o estudios de interacción fluido-estructura.

Proporciona soluciones tridimensionales de la evolución del fluido dentro del dominio, sometido a determinadas condiciones físicas, iniciales y de contorno, siendo posible la resolución numérica de las ecuaciones de Navier-Stokes descritas en el capítulo anterior.

### 5.1. Ventajas y desventajas del modelado con FLOW-3D

Este tipo de software resulta muy versátil para aquellos ingenieros que investigan el comportamiento dinámico de los fluidos. Entre sus ventajas destaca:

- La interfaz gráfica resulta bastante intuitiva, facilitando el aprendizaje de nuevos usuarios. La geometría, el mallado, las condiciones de contorno y determinados parámetros se definen de manera didáctica e ilustrativa.
- Permite importar geometrías complejas mediante un archivo CAD (Computer-Aided Design) en formato .stl (STereo Lithography). Además, la implementación del algoritmo FAVOR (Fractional Area/Volume Obstacle Representation), capaz de pre-procesar la geometría, muestra una interpretación de la misma en función de la calidad del mallado.
- El método de Volumen de Fluido (VOF) se emplea en FLOW-3D para resolver flujos en lámina libre, siendo el volumen ocupado por el gas adyacente al líquido representado únicamente por una presión y temperatura uniformes.
- El pre-procesamiento de la simulación facilita la detección de errores en los parámetros de la simulación, conocer el número de celdas generadas en el dominio y el tamaño de los archivos de resultados. El proceso de simulación es dinámico, aceptando correcciones o modificaciones con la simulación activa.
- La herramienta de post-procesamiento para la generación de gráficos o vistas en 1D, 2D y 3D puede ser ejecutada a medida que avanza la simulación, sin necesidad de que ésta se haya completado, para la visualización progresiva de resultados y verificación del correcto funcionamiento de la misma.

Así mismo FLOW-3D presenta ciertas desventajas, entre las que cabe destacar las siguientes:

- Permite únicamente el empleo de mallas estructuradas, siendo poco apropiado en el análisis de geometrías complejas al no ser posible la construcción de mallas con distintos tamaños de celdas a lo largo del dominio de simulación.
- El tamaño de celda utilizado es inversamente proporcional al tamaño del archivo y al tiempo de la simulación. Al disminuir el tamaño de celda se incrementan considerablemente los recursos computacionales y de procesamiento de datos, ocupando gran cantidad de espacio en el equipo y requiriendo mayor tiempo de simulación.

### 5.2. Mallado en FLOW-3D

FLOW-3D subdivide el dominio fluido mediante elementos prismáticos rectangulares que constituyen una malla estructurada susceptible de ser definida en un sistema de coordenadas cartesiano o cilíndrico. También es posible generar múltiples bloques de malla, lo que supone la creación de una malla eficiente para modelar dominios de flujo complejos. Estos bloques de malla pueden encontrarse completamente dentro de otro bloque de malla (bloque anidado), compartir un límite con otro bloque de malla (bloque vinculado), o superponerse parcialmente (bloque superpuesto).

Al configurar un bloque de malla se ha de prestar atención ya que sus límites definen la región del flujo. En regiones específicas que requieran mayor resolución es posible ubicar bloques de malla individuales. Asimismo, la calidad del mallado afecta a la precisión con la que es resuelta la geometría.

Para configurar una malla cartesiana se han de definir al menos dos planos de malla en cada dirección, siendo ésta uniforme si no se especifican planos de malla adicionales dentro del dominio. Los planos de malla dentro del dominio permiten establecer el tamaño de las celdas adyacentes o el número de celdas entre el plano de malla y el siguiente plano de malla especificada (FLOW Science Inc., 2016).

La malla de diferencias finitas utilizada para la resolución de las ecuaciones de gobierno del problema, consiste en celdas rectangulares como se indica en la siguiente figura, donde los valores de las presiones ( $p$ ), fracciones de fluido ( $F$ ), fracción de volumen ( $V$ ), densidades ( $\rho$ ), energía interna ( $I$ ), cantidad de turbulencia por energía ( $q$ ), disipación ( $D$ ), y viscosidad ( $\mu$ ) se almacenan en el centro del volumen, mientras que los parámetros de la pared son  $A$  (fracción de área), y los vectores de velocidad,  $u$ ,  $v$  y  $w$ .

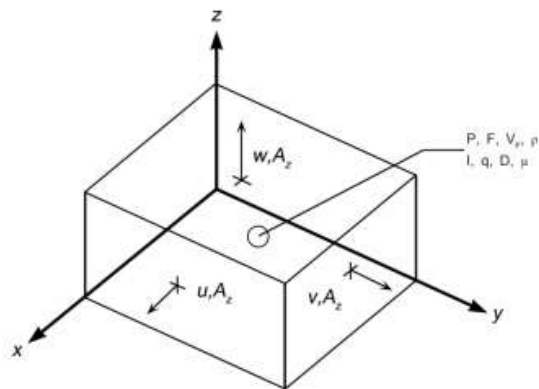


Figura 19. Ubicación de las variables en una celda de malla (FLOW Science Inc., 2016)

FLOW-3D con el objetivo de evitar errores y poder conseguir resultados más precisos propone cumplir con una serie de recomendaciones para mallas cartesianas (FLOW Science Inc., 2016):

- Se ha de prestar atención a las relaciones máximas de tamaño de celda adyacente y las relaciones máximas de aspecto en la malla, debiendo evitarse la sobreespecificación de la malla.
- Se recomienda que el tamaño entre las celdas adyacentes sea cercano a la unidad, sin exceder de 1.25 para obtener resultados eficientes. Asimismo, las relaciones de aspecto de la celda deben encontrarse próximas a la unidad y no exceder de 3.0.
- En áreas con alta presión o gradientes de cantidad de movimiento o con tensión superficial, las relaciones de aspecto de la celda deben estar lo más cerca posible de 1.0.

### 5.3. Algoritmo FAVOR

La generación de mallas en el software FLOW-3D es un proceso altamente automatizado. El código utiliza el algoritmo FAVOR, posibilitando la representación de superficies complejas sin necesidad de una malla ajustada al sólido, haciendo independientes la definición de la malla y la geometría.

El método FAVOR se ve afectado por la resolución de la cuadrícula computacional, al determinar la ratio área/volumen de cada celda. Se asigna un valor entre cero y uno para definir el grado de porosidad del medio, siendo el valor uno una celda sin obstáculo (vacía), y el valor cero una celda con obstáculo.

Para ello, este tipo de enfoque trata de determinar qué esquinas de la cara de celda están dentro de la geometría definida, considerando que:

- La cara completa de una celda está dentro de la geometría cuando sus cuatro esquinas se localicen dentro de la geometría.
- Del mismo modo, si todas las esquinas se encuentran fuera, se supone que toda la cara está fuera de la geometría.
- En un caso intermedio, en el que algunas esquinas de la cara se presentan dentro de la geometría y otras afuera, se halla la intersección de la geometría con los bordes de la cara, suponiendo conexiones en línea recta entre los puntos de intersección dentro de la cara.

El supuesto de línea recta introduce un error en el cálculo de la fracción de área cuando el límite del sólido se curva dentro de la celda. Adicionalmente, implica que los elementos que son más pequeños que el tamaño de la celda no se resuelven, como ocurre con una de las esferas de la Figura 20.

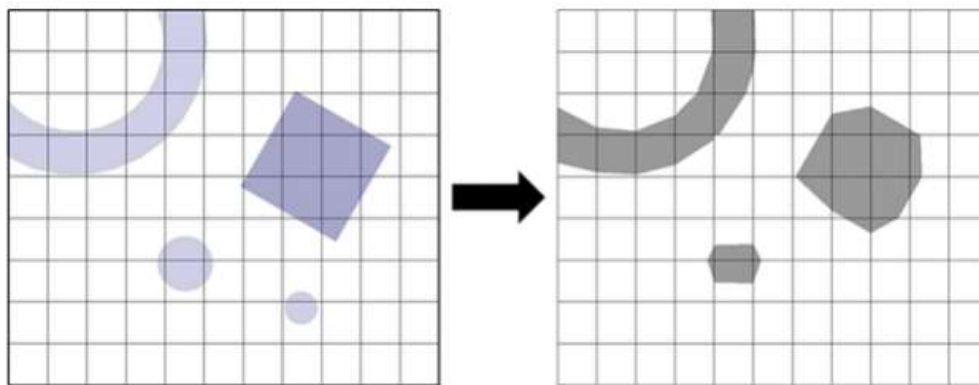


Figura 20. Sólido a modelar (izquierda) y sólido interpretado por el método FAVOR (derecha) (FLOW Science Inc., 2016)

#### 5.4. Modelización de la superficie libre (método VOF)

FLOW-3D modela la superficie libre, interfaz entre líquido y gas, mediante una técnica de rastreo y localización aplicando el método Volume of Fluid (VOF) desarrollado por Hirt y Nichols (1981). El modelado de superficies libres se presenta como todo un reto en cualquier entorno computacional, debido a la discontinuidad que experimentan en superficie los parámetros de flujo y ciertas propiedades de los fluidos, tales como densidad, velocidad y presión.

El método VOF se compone de tres componentes principales: Un esquema para localizar la superficie emplea la función de fracción de volumen del fluido para determinar la cantidad de líquido en cada celda computacional, un algoritmo de

advección para el rastreo de la superficie como un cambio brusco que se mueve a través de la malla computacional, y un medio de aplicación de las condiciones de contorno en la interfaz que considera una presión normal a la superficie libre y desprecia el esfuerzo cortante.

La fracción de volumen del fluido ( $F$ ) es utilizada para definir el estado de las celdas, las cuales pueden encontrarse: vacías, llenas o parcialmente llenas con fluido. El modelo numérico FLOW-3D identifica la celda ocupada completamente por el gas como un espacio vacío de masa, en donde el valor de la fracción de fluido es igual a 0, no resolviendo la dinámica de la fase gaseosa. La celda totalmente ocupada por el líquido se identifica con el valor de 1. Por su parte, la celda parcialmente llena tiene un valor entre 0 y 1 (Figura 21).

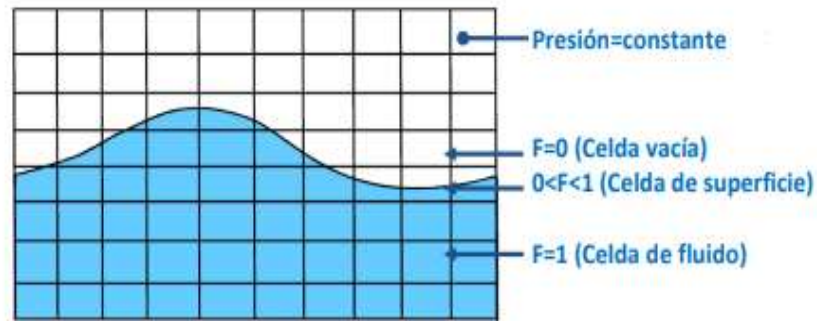


Figura 21. Representación del método VOF (FLOW Science Inc., 2015)

#### 5.4.1. Ecuación del flujo en lámina libre (VOF)

La función de volumen de fluido  $F(x, y, z, t)$ , representa el volumen de fluido por unidad de volumen según las siguientes ecuaciones:

$$\frac{\partial F}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left[ \frac{\partial}{\partial x} (FA_x u) + R \frac{\partial}{\partial y} (FA_y v) + \frac{\partial}{\partial z} (FA_z w) + \xi \frac{FA_x u}{x} \right] = F_{DIF} + F_{SOR} \quad (67)$$

$$F_{DIF} = \frac{1}{V_F} \left[ \frac{\partial}{\partial x} \left( v_F A_x \frac{\partial F}{\partial x} \right) + R \frac{\partial}{\partial x} \left( v_F A_y R \frac{\partial F}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( v_F A_z \frac{\partial F}{\partial z} \right) + \xi \frac{v_F A_x F}{x} \right] \quad (68)$$

El coeficiente  $v_F = c_F \mu / \rho$  se denomina coeficiente de difusión, donde  $c_F$  es una constante recíproca y está relacionada con el número de Schmidt. El término de difusión solo tiene valor cuando se produce la mezcla de dos fluidos.

$F_{SOR}$  es la tasa de cambio en el tiempo de la fracción de volumen del fluido asociada con la fuente de masa para el fluido.

$F$  representa la presencia de fluido en el modelo para un solo fluido. Se considera que existe fluido para  $F = 1$ . En caso contrario,  $F = 0$ , lo que representa regiones llenas de vapor o gas, sin masa fluida, que tienen asignada una presión uniforme.

#### 5.4.2. Aproximaciones de advección de la interfaz fluida

Este código proporciona distintos métodos para determinar interfaces fluidas, con aplicación específica según el problema de flujo planteado. Las interfaces fluidas pueden clasificarse según sean una interfaz nítida o una interfaz difusa.

- **Automático:** método empleado por defecto, elige la opción más adecuada y con mejor ajuste según la cantidad de fluidos y la presencia de una interfaz nítida.
- **Un fluido sin superficie libre:** esta opción desactiva el método VOF, por lo que no se explora la fracción de fluido. Su aplicación se reduce a simulaciones de flujo confinado de un solo fluido sin vacío.
- **Dos fluidos con interfaz difusa:** se emplea cuando se presentan dos flujos de fluidos sin una interfaz nítida, dada su capacidad de mezcla, como es en el caso del aire y humo. En este caso se utiliza un método de advección de celda dominante.
- **Dos fluidos con interfaz nítida:** adecuado para simulaciones de dos fluidos con una interfaz nítida. Se usa un método de advección de la celda dominante donde la celda dominante puede estar a ambos lados de la interfaz.
- **Un fluido con superficie libre:** similar al caso anterior. En este caso, solo se simula un fluido y la celda dominante siempre está en el lado  $F = 1$  de la interfaz.
- **Método Lagrangiano sin ruptura:** con aplicación en flujos de uno y dos fluidos, con gran exactitud en el seguimiento de interfaces nítidas en movimientos tridimensionales complejos.
- **Método Lagrangiano con ruptura (TruVOF):** con aplicación en flujos de uno y dos fluidos, con gran exactitud en el seguimiento de interfaces nítidas en movimientos tridimensionales complejos. Produce un error de volumen acumulado más bajo que el resto de métodos en FLOW-3D.

#### 5.5. Condiciones de contorno

Las ecuaciones que gobiernan el movimiento del fluido pueden clasificarse como problemas de valor límite inicial, lo que significa que la solución debe conocerse en el momento inicial (condiciones iniciales) y en los límites (condiciones de contorno) (FLOW Science Inc., 2016).

Este programa cuenta con diversas condiciones de contorno que se pueden definir en las caras de los bloques de malla (FLOW Science Inc., 2016):

En una condición de contorno tipo continuidad se establece una condición de gradiente cero en el límite para representar una continuación suave del flujo a través del mismo, las variables del flujo permanecen constantes en el contorno.

La condición de contorno tipo superposición de cuadrícula únicamente es de aplicación en simulaciones reiniciadas. Establece como condición de contorno la solución de la simulación de origen de reinicio en esa localización, en el tiempo de reinicio.

Una condición de contorno tipo salida libre no requiere gradiente cero en la frontera. Esta condición límite permite al flujo abandonar el área de simulación sin ningún impacto en el flujo aguas arriba.

Una condición tipo presión especificada permite fijar la presión en la frontera. Si se especifica la elevación del fluido, la presión en el límite seguirá una distribución hidrostática.

Cuando la condición de contorno es tipo velocidad, se establece la velocidad del flujo en el límite de la malla, la cual puede ser constante o depender del tiempo, y queda aplicada de manera uniforme en toda la cara del bloque de malla. Sin embargo, la geometría puede interponerse bloqueando parte de esta cara.

La condición de contorno de simetría permite reducir el tamaño de la simulación cuando existe simetría. Se aplica una condición de gradiente cero en el límite, así como una condición de velocidad cero normal al límite. No hay flujo ni transferencia de calor a través del límite y las tensiones de corte no son calculadas.

La condición tipo tasa de volumen fluido aplica un caudal de entrada a través de la frontera que puede ser constante o variable, definiendo en este último caso el hidrograma de entrada. Por defecto, el vector de dirección del flujo entrante se considera normal al límite de la malla.

La condición tipo pared considera una condición de antideslizamiento en el límite, aunque no se puede especificar la rugosidad de la pared. No es posible el flujo del fluido a través de la misma, por lo que se exige velocidad cero normal al límite.

En la condición tipo oleaje se aplica el campo de velocidad asociado con el tipo de onda.

Cuando se configura una condición tipo periódica, los límites periódicos se aplican en pares y cualquier fluido que salga a través de un límite, se reintroduce a través del otro límite, dando continuidad de forma periódica.

## 6. ESTUDIO DE APLICACIÓN

### 6.1. Introducción

El estudio tiene por finalidad evaluar el comportamiento hidrodinámico, para el caudal de diseño, de un reactor biológico tipo A2O perteneciente a la Estación Depuradora de Aguas Residuales de Roldán, Lo Ferro y Balsicas, en el T.M. de Torre Pacheco (Murcia). La Figura 22 proporciona una vista en planta de la EDAR.



Figura 22. Sistema de depuración Roldán, Lo Ferro y Balsicas (Esamur, 2018)

El reactor cuenta con dos líneas de tratamiento compuestas cada una de ellas por tres cámaras de volumen total  $6,489.5 \text{ m}^3$ , con la siguiente asignación de volumen: zona anaerobia 10%, zona anóxica 20% y zona óxica 70%.

La sección es constante para toda la línea, de 20 m de ancho y 5.71 m de alto. La única modificación se presenta en la longitud de los tanques: 6.4 m para el tanque anaerobio, 12.8 m para el tanque anóxico, y 45.4 m para el tanque aireado. El calado medio se encuentra entorno a los 5 m en función del caudal circulante.

Las distintas zonas se encuentran separadas por tabiques. Estos muros presentan dos orificios de sección  $0.2 \times 0.4 \text{ m}^2$  en la parte inferior, lo que permite la comunican de las cámaras a través del fondo, no existiendo el vertido superior para el caudal de diseño.



La entrada al reactor biológico tiene lugar a través de una sección de  $0.3 \times 0.3 \text{ m}^2$  ubicada en la primera cámara. Asimismo, el reactor opera sin recirculación externa de fangos desde el decantador secundario.

El caudal de diseño es de  $5,500 \text{ m}^3/\text{día}$ , a pesar de que actualmente se trata un caudal medio de  $1,300 \text{ m}^3/\text{día}$ , operando únicamente con una línea.

La cámara anaerobia dispone de dos agitadores sumergibles de  $2.5 \text{ kW}$  de potencia. Por el contrario, en la cámara anóxica se instaló un único agitador de potencia superior ( $5.5 \text{ kW}$ ), para evitar la sedimentación de sólidos en suspensión en el licor mezcla.

La agitación de la zona óxica se reduce a aquella generada por la propia aireación. El aporte de aire se realiza mediante la instalación de tres parrillas de difusores de membrana de burbuja fina inatascable por línea ( $792 \text{ difusores/línea}$ ).

## **6.2. Modelo numérico**

La metodología adoptada para la resolución del modelo numérico tridimensional de la cámara anaerobia es la dinámica de fluidos computacional. El programa FLOW-3D resuelve las ecuaciones de Navier-Stokes para el agua a través del método de diferencias finitas, operando de manera iterativa a fin de reducir el error hasta un valor aceptable.

Este capítulo trata de explicar cómo se han configurado las simulaciones y qué parámetros se han definido para reproducir el comportamiento del flujo de forma detallada, permitiendo conocer la hidrodinámica de los tanques. En consecuencia, se facilita la posterior comprensión de los resultados obtenidos por el modelo. En este sentido, se detallará todos aquellos aspectos relacionados con la geometría de estudio y el mallado de la misma, los fluidos presentes, condiciones de contorno e iniciales consideradas, modelos de turbulencia o métodos numéricos de resolución empleados.

### **6.2.1. Fluidos**

FLOW-3D incorpora una base de datos de propiedades de los materiales permitiendo agilizar la definición de los fluidos. En este caso, el líquido seleccionado ha sido agua a  $20^\circ\text{C}$ , mientras que el gas se corresponde con aire a  $15^\circ\text{C}$ .

### **6.2.2. Geometría y mallado**

La geometría se generó con ayuda del software AutoCAD de modelado 3D que permite exportar objetos sólidos 3D al formato STL (estereolitografía). Este tipo de

archivo define la forma del objeto mediante una malla de pequeños triángulos definidos por tres puntos y un vector normal a la superficie hacia afuera. En la siguiente figura se muestra una vista 3D en modo inalámbrico de la geometría del reactor generado en AutoCAD, además de una vista frontal de la cámara anaerobia.

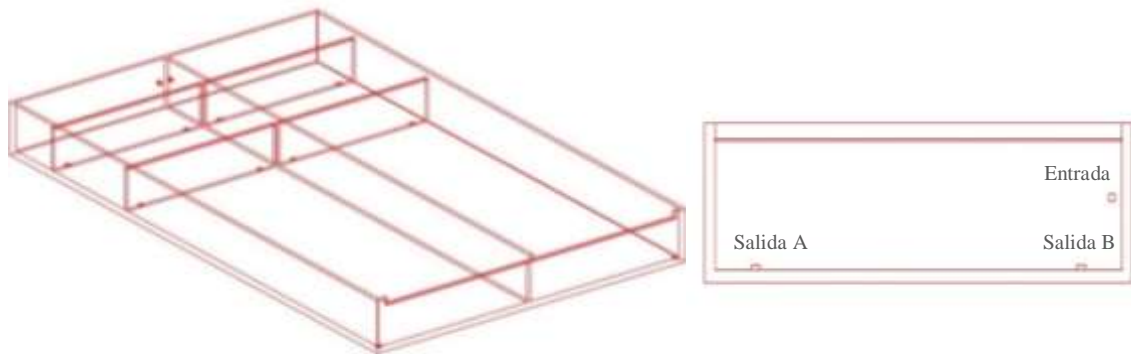


Figura 23. Geometría del reactor: vista 3D (izquierda) y vista frontal (derecha)

Se emplea una malla estructurada de celdas rectangulares para definir el dominio computacional de la cámara anaerobia, estudiando distintos tamaños de malla (0.6 m, 0.5 m, 0.4 m), además de bloques de malla anidados con tamaño de malla de 0.1 m situados en los orificios inferiores de salida y en la entrada, a fin de lograr la correcta lectura de los mismos (Figura 24). Al encontrarnos ante un problema simétrico, se ha simulado únicamente una línea del reactor.

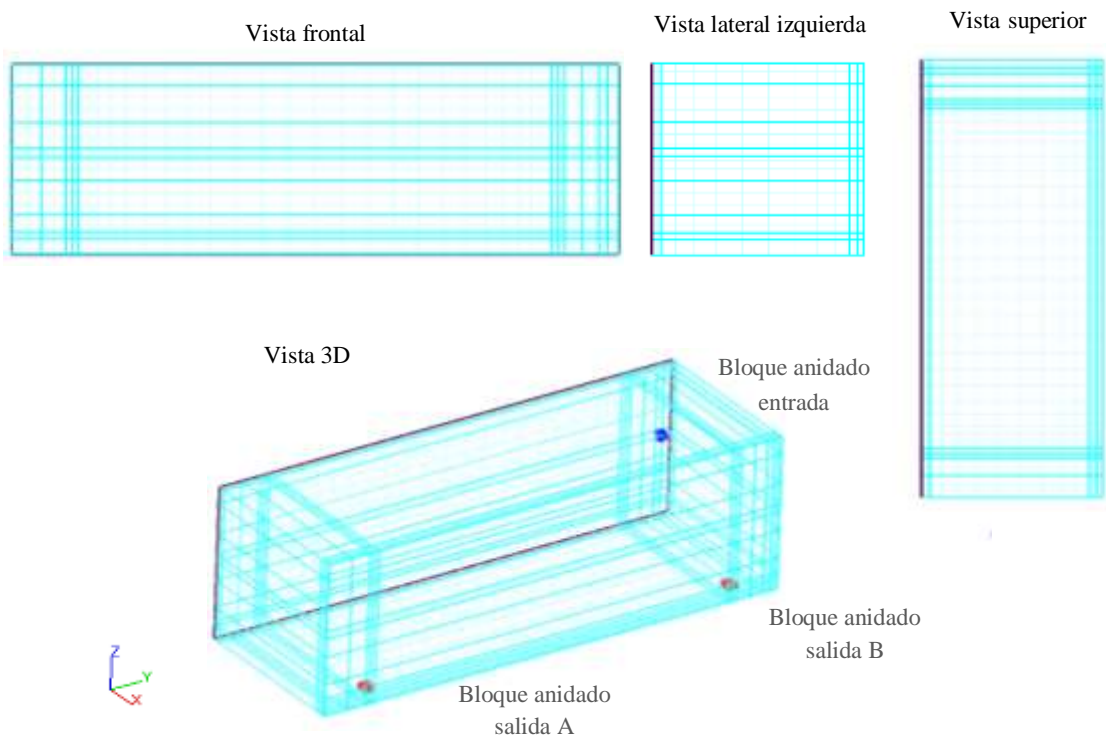


Figura 24. Vistas de la malla generada para definir el dominio fluido

En la Figura 24 se observan los distintos planos de malla definidos y que coinciden con los límites de la entrada y las salidas en cada dirección, facilitando la conexión de la malla general con los bloques anidados. Se han definido planos de malla adicionales para mejorar la calidad de la malla, prestando atención a las relaciones de aspecto, las relaciones de tamaño de celda adyacente, los tamaños de celda mínimo y máximo, etc.

La geometría importada en formato *.stl* es pre-procesada, para la correcta simulación del modelo, aplicando la herramienta FAVOR. Esta lleva a cabo un renderizado inicial de la geometría introducida e identifica elementos sólidos (Figura 25), influyendo la calidad de la malla de manera directa.

En este caso, la mayor dificultad se ha encontrado en la correcta interpretación de los orificios de salida y de la entrada, dado su reducido tamaño en relación a las dimensiones generales de la cámara, lo que exigía el refinamiento de la malla en esta zona.

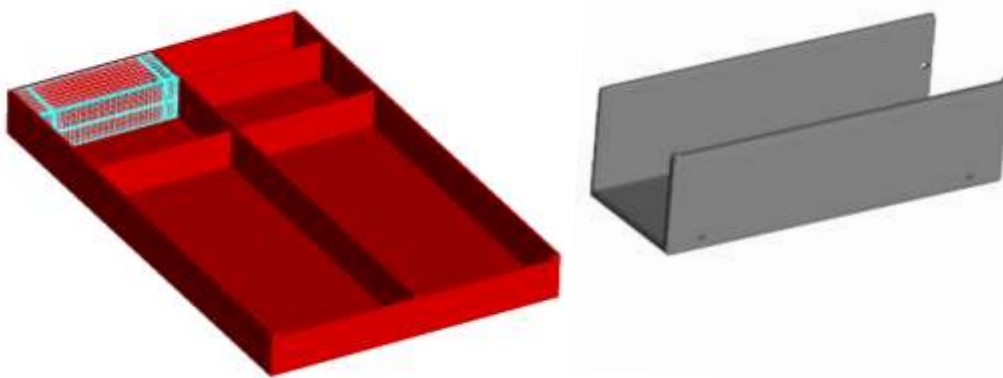


Figura 25. Mallado del modelo 3D (izquierda) y renderizado FAVOR (derecha)

### 6.2.3. Condiciones de contorno e iniciales

Para definir las condiciones de contorno de la cámara anaerobia es necesario conocer la altura de agua en dicha cámara, lo que permitirá fijar una condición de salida tipo presión. Para ello, se recurre a la expresión de la capacidad de desagüe de un aliviadero de labio fijo aplicada al aliviadero de la última cámara, asumiendo que esta altura es común al resto de cámaras al ser las pérdidas de carga despreciables.

$$Q \left( m^3/s \right) = \frac{2}{3} \sqrt{2g} \cdot C_b \cdot b \cdot H_o^{\frac{3}{2}} = C \cdot b \cdot H_o^{\frac{3}{2}} \quad (69)$$

donde  $Q$  es el caudal,  $C$  es un coeficiente con valor 1.83 para perfiles de pared delgada y  $b$ , el ancho útil del labio del aliviadero siendo este de 19.2 m.

De este modo, la expresión anterior permite hallar la carga  $H_o$  sobre el aliviadero y como consecuencia, la elevación del fluido.

Las condiciones de contorno se configuran para cada bloque de malla y se consideran aplicadas en las caras de la malla. Se establece (Figura 26):

- En la entrada ( $x_{min}$ ), una condición de caudal constante e igual a  $0.032 \text{ m}^3/\text{s}$ , siendo este el caudal de diseño expresado en  $\text{m}^3/\text{s}$  para cada línea de tratamiento.
- Como condición de salida ( $x_{máx}$ ) se especifica una condición tipo presión hidrostática, considerando la elevación del fluido en 5.49 m.
- En  $y_{min}$  e  $y_{máx}$  se fija una condición tipo pared sin deslizamiento.
- Para  $z_{min}$  y  $z_{máx}$  la condición seleccionada es la tipo simetría (condición estándar de FLOW-3D).
- Los bloques anidados, tanto los ubicados en los pasos como el de la entrada, poseen la condición de contorno tipo simetría en cada una de las caras del bloque de malla.
- Para las paredes sólidas de hormigón se ha considerado una rugosidad de 0.001 m.

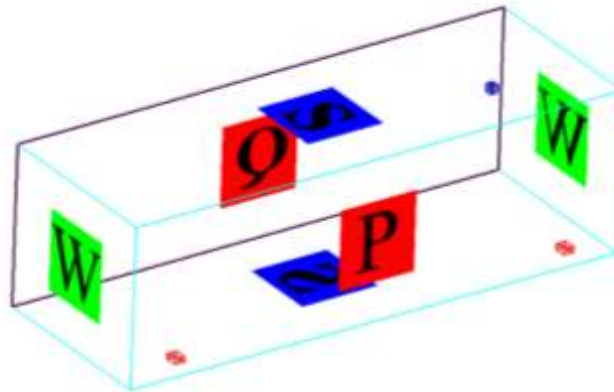


Figura 26. Condiciones de contorno de la malla

Como condición inicial se ha fijado la elevación del fluido, asignando un valor a la coordenada  $z$  de la superficie libre de 5 m.

#### 6.2.4. Sondas

Las sondas definidas en el dominio fluido son puntos de control en los que se miden las distintas variables con mayor frecuencia, registrando un mayor número de datos. Permiten además comparar los resultados de distintos modelos en un mismo punto.

La Figura 27 muestra la ubicación de las sondas creadas en el modelo. Estas se encuentran distribuidas en el interior de la cámara anaerobia, disponiéndose sondas adicionales en las dos salidas de la cámara. En la figura, la entrada a la cámara viene indicada en azul, mientras que las salidas se muestran en color rojo.

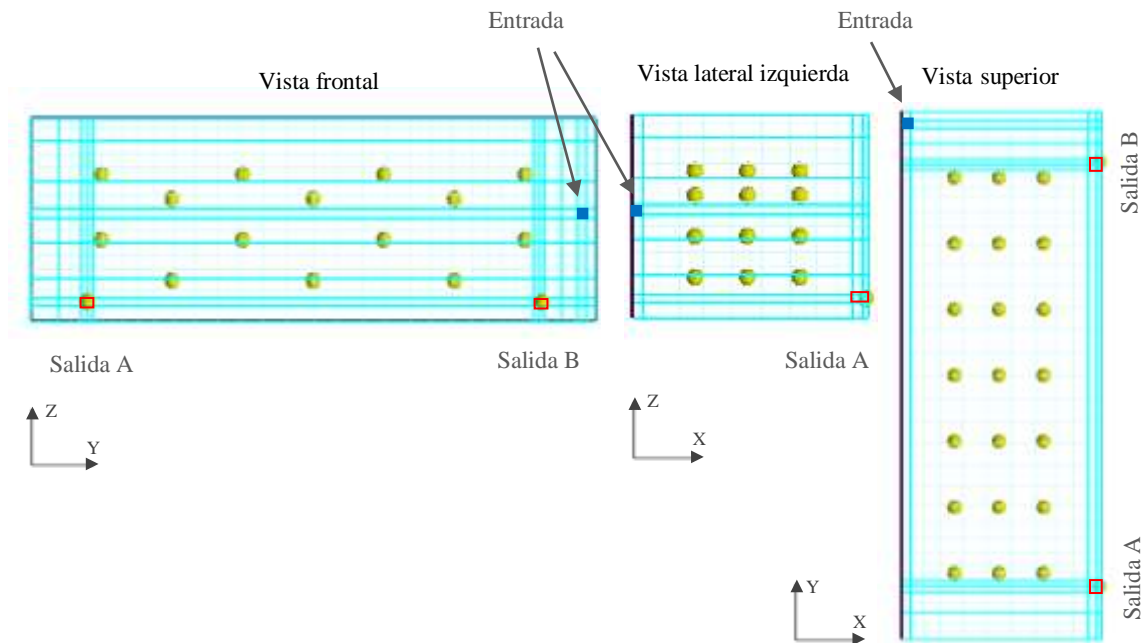


Figura 27. Ubicación de las sondas

### 6.2.5. Modelos activados

Se ha implementado un modelo de gravedad ingresando los valores para las componentes del vector de gravedad, correspondiéndole un valor de  $-9.81 \text{ m/s}^2$  a la componente  $z$ .

En cuanto al tipo de régimen, se comenzó simulando en régimen laminar a fin de simplificar el fenómeno bajo estudio para obtener una primera aproximación del comportamiento del flujo.

Posteriormente se incorpora un modelo de turbulencia que afecta a la exactitud de los resultados, proporcionando un escenario más realista. Estos modelos poseen la virtud de capturar los efectos derivados de la turbulencia en todas sus escalas sin el empleo de una malla excesivamente fina. De entre los modelos de turbulencia disponibles en el software, se optó por el empleo del modelo  $k-\varepsilon$  y del modelo RNG  $k-\varepsilon$ , habituales en el ámbito de la hidráulica.

Al ser un problema en lámina libre, se emplea el método de volumen de fluido (VOF) para modelar la superficie libre, reduciendo el coste computacional al resolver únicamente el agua y considerar el gas como una condición de contorno de presión, no resolviendo las ecuaciones de gobierno en el gas al existir una separación clara entre las fases. Para definir una interfaz nítida con fluidos no miscibles, se selecciona la opción de un único fluido e incompresible, como es el caso del agua.

### **6.2.1. Métodos numéricos seleccionados**

La convergencia del problema viene condicionada, además de por las condiciones de contorno impuestas, por el algoritmo numérico empleado y la estabilidad numérica. A pesar de que las opciones predeterminadas en el software presentan buenas prestaciones para la mayoría de problemas, es posible ajustar el método numérico empleado para el cálculo de la solución.

Uno de los controles consiste en ajustar el tamaño del intervalo de tiempo con el que son resueltas las ecuaciones, de manera que no se produzcan situaciones de inestabilidad del flujo y se mantenga la precisión de la solución.

Aunque este se fija automáticamente, tomando el valor más grande posible compatible con los criterios de estabilidad, ha sido necesario modificar manualmente su valor mínimo debido a que el valor predeterminado generaba un error al inicio de la simulación “Convective flux exceeded stability limit”. Este error se presenta cuando la velocidad del fluido presenta un número de Courant mayor a 1. Además, dicho tamaño de intervalo de tiempo se encuentra controlado únicamente por la estabilidad.

En las opciones del procesador se escoge resolver las ecuaciones de cantidad de movimiento y continuidad.

En cuanto a las opciones de solución de presión, el algoritmo empleado ha sido el GMRES de rápida convergencia. Este método implícito calcula los valores del paso de tiempo actual de forma iterativa empleando los valores del paso de tiempo anterior (FLOW Science Inc., 2016).

El método empleado para controlar la advección de volumen de fluido es el automático, que viene predeterminado por defecto, y determina cómo se mueve la fracción de fluido a través de la malla. El algoritmo del factor de empaquetamiento  $F$  es capaz de eliminar pequeños huecos generados en flujos con ruptura significativa de la superficie libre (entrada de bolsas de aire), en este caso este modelo ha sido desactivado.

## 7. RESULTADOS

En el siguiente apartado se exponen los resultados obtenidos del modelo numérico tridimensional elaborado en FLOW-3D, para analizar el comportamiento hidrodinámico de la cámara anaeróbica considerando un caudal de entrada de 2,750 m<sup>3</sup>/día. Se ha investigado la influencia del modelo de turbulencia y del tamaño de la malla en las distintas variables sujetas a estudio.

Se proporciona información relativa a la distribución de la velocidad del fluido, la distancia recorrida y el tiempo de retención hidráulico, posibilitando la detección de zonas muertas, cortocircuitos hidráulicos o caminos preferenciales de flujo, lo que facilita la propuesta de alternativas geométricas que logran que el volumen total del reactor resulte eficiente.

Uno de los aspectos más destacables de la geometría de estudio reside en la ubicación relativa de la entrada respecto a los orificios de salida, localizándose ésta próxima a la salida B como muestra la Figura 23, lo que conduce a esperar que el flujo abandone el dominio por el orificio B antes que por el A. Por ello, se analizan los valores de TRH, velocidad y distancia recorrida por el fluido registrados en las sondas de cada una de las salidas.

Del mismo modo, se analiza el valor de las variables mencionadas anteriormente en sondas localizadas en el interior del reactor. Estas sondas se encuentran en la zona central de la cámara y a distintas alturas respecto a la solera, lo que revela la variación experimentada por las variables del flujo según la altura.

En problemas resueltos mediante métodos numéricos se recomienda estimar el índice de convergencia de la malla (Grid Convergence Index, GCI), propuesto por Roache (1994), para tres tamaños de malla distintos, a fin de determinar si el tamaño de malla está generando la convergencia de los resultados. Esta metodología permite detectar si las soluciones están dentro del rango asintótico de convergencia. No obstante, aunque un refinamiento de la malla mejore la resolución, es posible que el valor asintótico no coincida con la solución física de las ecuaciones.

El índice de convergencia de la malla para la malla fina se define como:

$$GCI_{fine} = \frac{F_s \cdot |\varepsilon|}{(r^p - 1)} \quad (70)$$

donde  $F_s$  es un factor de seguridad de valor 1.25 cuando se comparan tres o más tamaños de malla,  $\varepsilon$  el error relativo de los resultados obtenidos,  $r$  el cociente entre los tamaños de malla, y  $p$  un coeficiente de valor 2 para esquemas de resolución de segundo orden.

### 7.1. Análisis de resultados a la salida de la cámara anaerobia

La cámara, como veíamos, dispone de dos salidas en su parte inferior. Se ha tomado un punto de cada orificio de salida para la medición de las variables de flujo, de modo que se pueda contrastar la información de cada una de ellas.

#### 7.1.1. Tiempo de retención hidráulico

Considerando los resultados mostrados en la Figura 28, el tiempo de retención en las dos salidas de la cámara anaeróbica es diferente. La reducción del tamaño de la malla tiende a disminuir el TRH en la sonda A y a aumentar el tiempo de retención en la sonda B, efecto observado con los tres modelos de turbulencia analizados. Esto reduce considerablemente la diferencia entre ambos valores para los modelos de turbulencia  $k-\varepsilon$  y RNG  $k-\varepsilon$  cuando se emplea un tamaño de malla de 0.4 m. Con el modelo  $k-\varepsilon$  se obtiene un tiempo de retención ligeramente superior en el paso A, al contrario de lo que ocurre con el modelo RNG  $k-\varepsilon$  donde el orificio B experimenta un tiempo de retención superior.

En cuanto a la comparación de los modelos de turbulencia, el RNG  $k-\varepsilon$  tiende a obtener los mayores tiempos de retención en la salida B, mientras que los casos de flujo laminar obtienen el mayor TRH para las mallas más finas en la sonda A (0.5 m y 0.4 m). Además, el modelo laminar y el modelo  $k-\varepsilon$  obtienen tiempos de retención similares en la salida B.

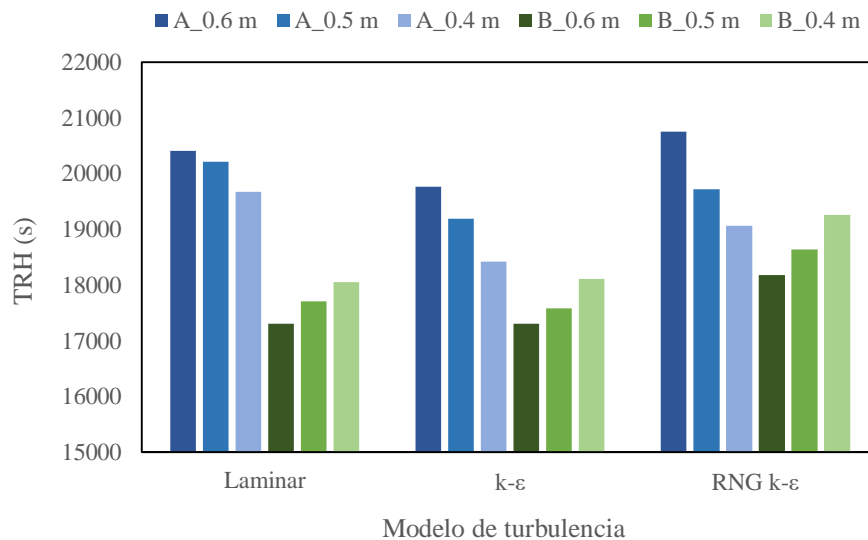


Figura 28. Tiempo de retención hidráulico medido en las sondas ubicadas en los orificios de salida en función del tamaño de la malla y del modelo de turbulencia



En la Figura 29 se muestra el error relativo del tiempo de retención hidráulico obtenido con los tamaños de malla más gruesos respecto al calculado con la malla más fina. Como se desprende de la misma, el tamaño de malla más grueso es el que presenta mayor error en ambas salidas y para los distintos modelos de turbulencia, llegando a alcanzar un valor de aproximadamente un 9% en la salida A y de -5.6% en la salida B con el modelo RNG  $k-\epsilon$ . Dado que las diferencias entre los tamaños de mallado de 0.5 y 0.4 m son inferiores a  $\pm 4\%$ , se podría considerar que el tamaño de 0.4 m está próximo a su valor asintótico en los tres modelos de turbulencia analizados.

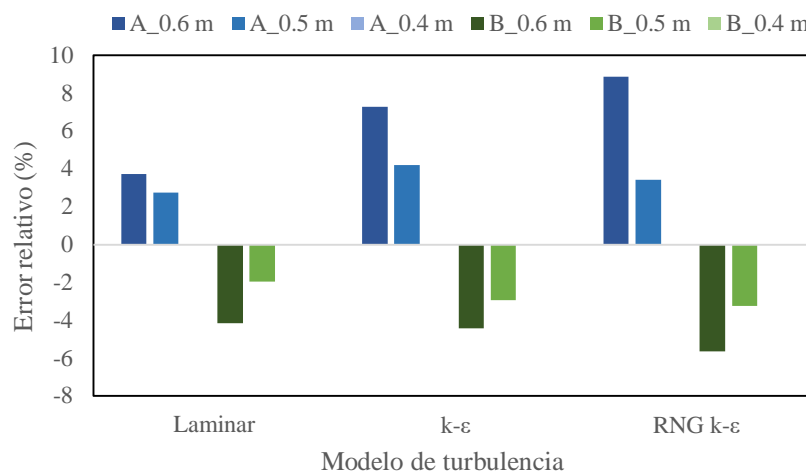


Figura 29. Error relativo del tiempo de retención hidráulico, entre los distintos tamaños de malla, medida en las sondas ubicadas en los orificios de salida

Además del error relativo, y puesto que este no tiene en cuenta el tamaño de malla empleado, es habitual recurrir a otro tipo de indicadores para analizar la influencia del tamaño de malla y confirmar que el modelo numérico está convergiendo adecuadamente. Es por ello que se ha calculado el índice de convergencia de la malla, conocido por sus siglas GCI, para cada uno de los modelos de turbulencia tal y como muestran las Tablas 4, 5 y 6.

| Modelo Laminar      |          |          |                    |          |          |          |
|---------------------|----------|----------|--------------------|----------|----------|----------|
| Tamaño de malla (m) | TRH (s)  |          | Error relativo (%) |          | GCI (%)  |          |
|                     | Salida A | Salida B | Salida A           | Salida B | Salida A | Salida B |
| 0.6                 | 20408    | 17311    | -                  | -        | -        | -        |
| 0.5                 | 20219    | 17708    | 0.94               | -2.24    | 2.66     | 6.37     |
| 0.4                 | 19677    | 18061    | 2.76               | -1.95    | 6.12     | 4.33     |

Tabla 4. Índice de convergencia de la malla para el tiempo de retención hidráulico según un modelo laminar

| <b>Modelo <math>k-\epsilon</math></b> |                |          |                           |          |                |          |
|---------------------------------------|----------------|----------|---------------------------|----------|----------------|----------|
| <i>Tamaño de malla (m)</i>            | <i>TRH (s)</i> |          | <i>Error relativo (%)</i> |          | <i>GCI (%)</i> |          |
|                                       | Salida A       | Salida B | Salida A                  | Salida B | Salida A       | Salida B |
| 0.6                                   | 19767          | 17313    | -                         | -        | -              | -        |
| 0.5                                   | 19197          | 17582    | 2.97                      | -1.53    | 8.43           | 4.35     |
| 0.4                                   | 18423          | 18117    | 4.20                      | -2.95    | 9.34           | 6.55     |

Tabla 5. Índice de convergencia de la malla para el tiempo de retención hidráulico según un modelo de turbulencia  $k-\epsilon$

| <b>Modelo RNG <math>k-\epsilon</math></b> |                |          |                           |          |                |          |
|---|----------------|----------|---------------------------|----------|----------------|----------|
| <i>Tamaño de malla (m)</i>                | <i>TRH (s)</i> |          | <i>Error relativo (%)</i> |          | <i>GCI (%)</i> |          |
|   | Salida A       | Salida B | Salida A                  | Salida B | Salida A       | Salida B |
| 0.6                                       | 20762          | 18179    | -                         | -        | -              | -        |
| 0.5                                       | 19718          | 19640    | 5.29                      | -2.47    | 15.03          | 7.02     |
| 0.4                                       | 19068          | 19266    | 3.41                      | -3.25    | 7.58           | 7.23     |

Tabla 6. Índice de convergencia de la malla para el tiempo de retención hidráulico según un modelo de turbulencia RNG  $k-\epsilon$

El índice de convergencia de la malla es una medida del porcentaje que el valor calculado se aleja del valor numérico asintótico. Según la Tabla 4, para un modelo laminar al refinar la malla aumenta el GCI en la salida A, mientras que se consigue una disminución del GCI en la salida B. Al implementar un modelo de turbulencia  $k-\epsilon$  el GCI aumenta al refinar la malla en ambas salidas, por lo que el valor calculado se aleja del valor asintótico (Tabla 5). Con un modelo RNG  $k-\epsilon$  la reducción del tamaño de malla disminuye el GCI para la salida A y lo aumenta ligeramente en la salida B (Tabla 6).

Se pueden observar distribuciones del tiempo de retención similares para el modelo  $k-\epsilon$  y el modelo RNG  $k-\epsilon$ , con una gran zona muerta en las proximidades de la salida B debido a la recirculación del flujo (Figura 30). Esto puede explicar que existan tiempos de residencia similares en ambas salidas, aunque la salida B está ubicada frente a la entrada.

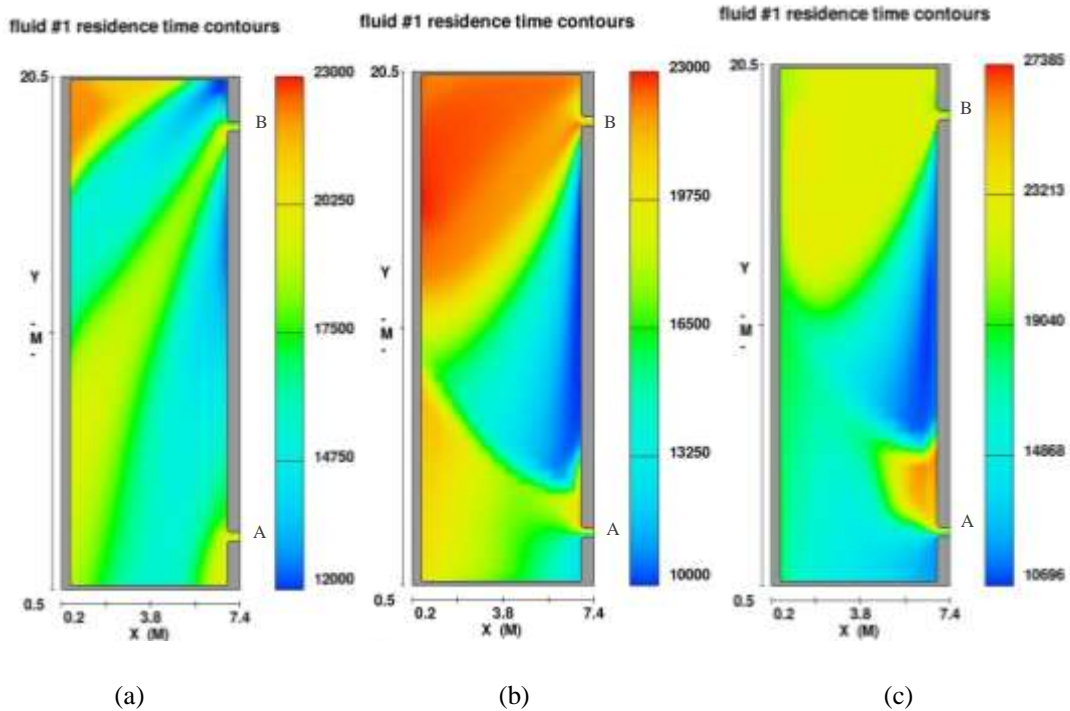


Figura 30. Tiempo de retención hidráulico para un plano horizontal a nivel de los orificios de salida (0.1 m sobre la solera) con un tamaño de malla de 0.4 m: (a) modelo laminar, (b) modelo  $k-\epsilon$ , (c) modelo RNG  $k-\epsilon$

### 7.1.2. Velocidad del fluido

En base a los resultados recogidos en la Figura 31, la velocidad en la salida B es ligeramente superior a la desarrollada en la salida A para cualquiera de los modelos de turbulencia considerados. En la salida B, al disminuir el tamaño de malla aumenta la velocidad con un modelo laminar. Sin embargo, al ejecutar un modelo de turbulencia  $k-\epsilon$  o RNG  $k-\epsilon$  la máxima velocidad se alcanza con un tamaño de malla de 0.5 m. En la salida A, por el contrario, al disminuir el tamaño de malla se registra un aumento de la velocidad para los modelos de turbulencia  $k-\epsilon$  y RNG  $k-\epsilon$ . En régimen laminar la mayor velocidad en la salida A tiene lugar para un tamaño de malla de 0.5 m.

El modelo laminar proporciona valores ligeramente superiores de la velocidad en la salida A para los tres tamaños de malla, y en la salida B para los tamaños de malla más finos (0.5 m y 0.4 m). Por otro lado, los valores mínimos de velocidad se obtienen en la salida A para el modelo de turbulencia  $k-\epsilon$  y en la salida B para el modelo RNG  $k-\epsilon$ .

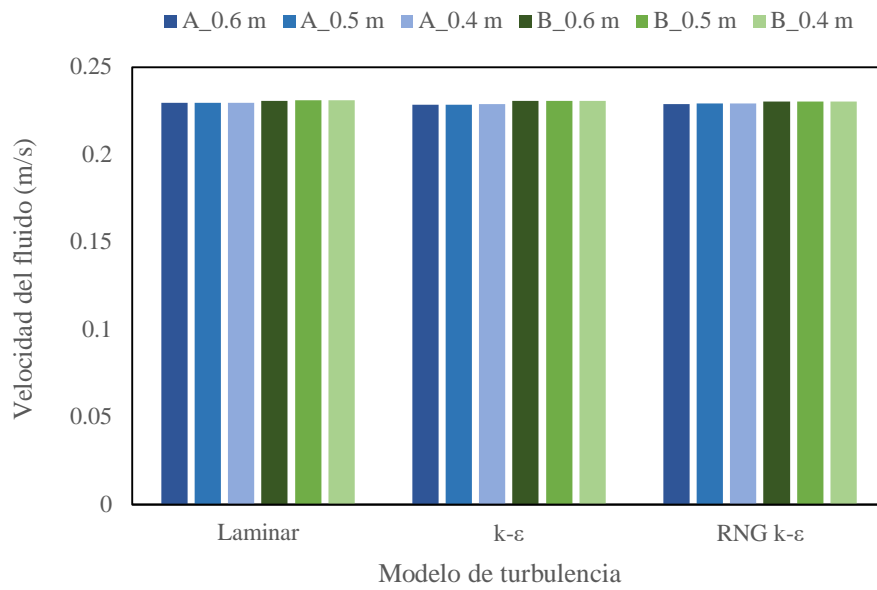


Figura 31. Velocidad del fluido medida en las sondas ubicadas en los orificios de salida en función del tamaño de la malla y del modelo de turbulencia

La siguiente figura muestra el error relativo de la velocidad calculada con los tamaños de malla más gruesos respecto a la malla más fina.

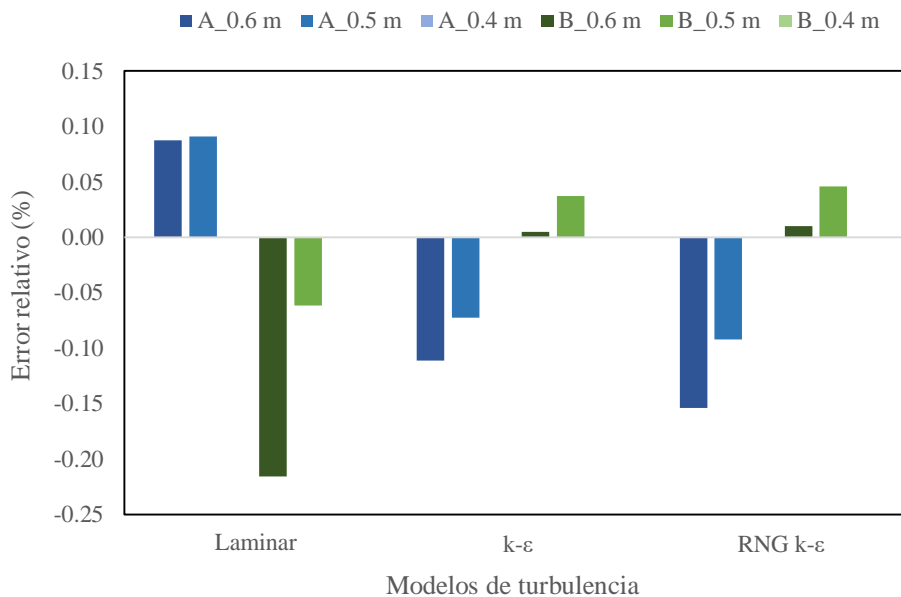


Figura 32. Error relativo de la velocidad total, entre los distintos tamaños de malla, medida en las sondas ubicadas en los orificios de salida

De manera general, según la Figura 32, los errores pueden considerarse despreciables al situarse por debajo del 1% ( $\pm 0.25\%$  en todos los casos). En la salida A, para un modelo laminar los tamaños de malla más gruesos presentan un error positivo similar de 0.09%, mientras que los otros dos modelos proporcionan errores negativos y de mayor magnitud al emplear una malla de 0.6 m, obteniéndose el máximo error con el modelo RNG  $k-\varepsilon$  y siendo este de -0.15%. En cuanto a la salida B, se invierte la tendencia de modo que es el modelo laminar el que proporciona errores negativos ligeramente superiores a -0.2% para el tamaño de malla más grueso y, sin embargo, el modelo  $k-\varepsilon$  y RNG  $k-\varepsilon$  presentan errores positivos superiores con el tamaño de malla 0.5 m de 0.04% y 0.05% respectivamente.

En relación al índice de convergencia de la malla para la velocidad (Tablas 7, 8 y 9), se observa que toma valores por debajo del 1% por lo que la banda de error es reducida y las soluciones se aproximan al valor asintótico. Para un modelo laminar, un refinamiento de la malla aumenta el GCI en la salida A y lo disminuye en la salida B, lo mismo ocurre con el modelo de turbulencia  $k-\varepsilon$ . En cambio, con el modelo RNG  $k-\varepsilon$  el empleo de una malla más fina se traduce en un ligero aumento del GCI en ambas salidas.

| <b>Modelo Laminar</b>      |                        |          |                           |          |                |          |
|----------------------------|------------------------|----------|---------------------------|----------|----------------|----------|
| <i>Tamaño de malla (m)</i> | <i>Velocidad (m/s)</i> |          | <i>Error relativo (%)</i> |          | <i>GCI (%)</i> |          |
|                            | Salida A               | Salida B | Salida A                  | Salida B | Salida A       | Salida B |
| 0.6                        | 0.230                  | 0.231    | -                         | -        | -              | -        |
| 0.5                        | 0.230                  | 0.231    | -0.004                    | -0.155   | 0.01           | 0.44     |
| 0.4                        | 0.230                  | 0.231    | 0.091                     | -0.061   | 0.20           | 0.14     |

Tabla 7. Índice de convergencia de la malla para la velocidad según un modelo laminar

| <b>Modelo <math>k-\varepsilon</math></b> |                        |          |                           |          |                |          |
|--|------------------------|----------|---------------------------|----------|----------------|----------|
| <i>Tamaño de malla (m)</i>               | <i>Velocidad (m/s)</i> |          | <i>Error relativo (%)</i> |          | <i>GCI (%)</i> |          |
|  | Salida A               | Salida B | Salida A                  | Salida B | Salida A       | Salida B |
| 0.6                                      | 0.228                  | 0.231    | -                         | -        | -              | -        |
| 0.5                                      | 0.229                  | 0.231    | -0.04                     | -0.03    | 0.11           | 0.09     |
| 0.4                                      | 0.229                  | 0.231    | -0.07                     | 0.04     | 0.16           | 0.08     |

Tabla 8. Índice de convergencia de la malla para la velocidad según un modelo de turbulencia  $k-\varepsilon$

| Modelo RNG $k-\varepsilon$ |                 |          |                    |          |          |          |
|----------------------------|-----------------|----------|--------------------|----------|----------|----------|
| Tamaño de malla (m)        | Velocidad (m/s) |          | Error relativo (%) |          | GCI (%)  |          |
|                            | Salida A        | Salida B | Salida A           | Salida B | Salida A | Salida B |
| 0.6                        | 0.229           | 0.230    | -                  | -        | -        | -        |
| 0.5                        | 0.229           | 0.230    | -0.06              | -0.04    | 0.18     | 0.101    |
| 0.4                        | 0.229           | 0.230    | -0.09              | 0.05     | 0.20     | 0.102    |

Tabla 9. Índice de convergencia de la malla para la velocidad según un modelo de turbulencia RNG  $k-\varepsilon$

La Figura 33 muestra la distribución de velocidades en el interior de la cámara a nivel de los orificios de salida. En el régimen laminar, la velocidad se distribuye de manera prácticamente uniforme en el interior de la cámara y es de mayor magnitud que la obtenida con los modelos de turbulencia  $k-\varepsilon$  y RNG  $k-\varepsilon$ , a excepción de zonas de tamaño reducido localizadas en dos de las esquinas donde la velocidad se ve reducida.

La distribución de la velocidad es similar para los modelos de turbulencia  $k-\varepsilon$  y RNG  $k-\varepsilon$ , donde la mayor velocidad se registra en una zona de gran tamaño en las proximidades de la salida B y en una zona reducida en las inmediaciones de la salida A. A pesar de estas dos regiones puntuales, en el resto de la cámara a este nivel, la velocidad es prácticamente cero.

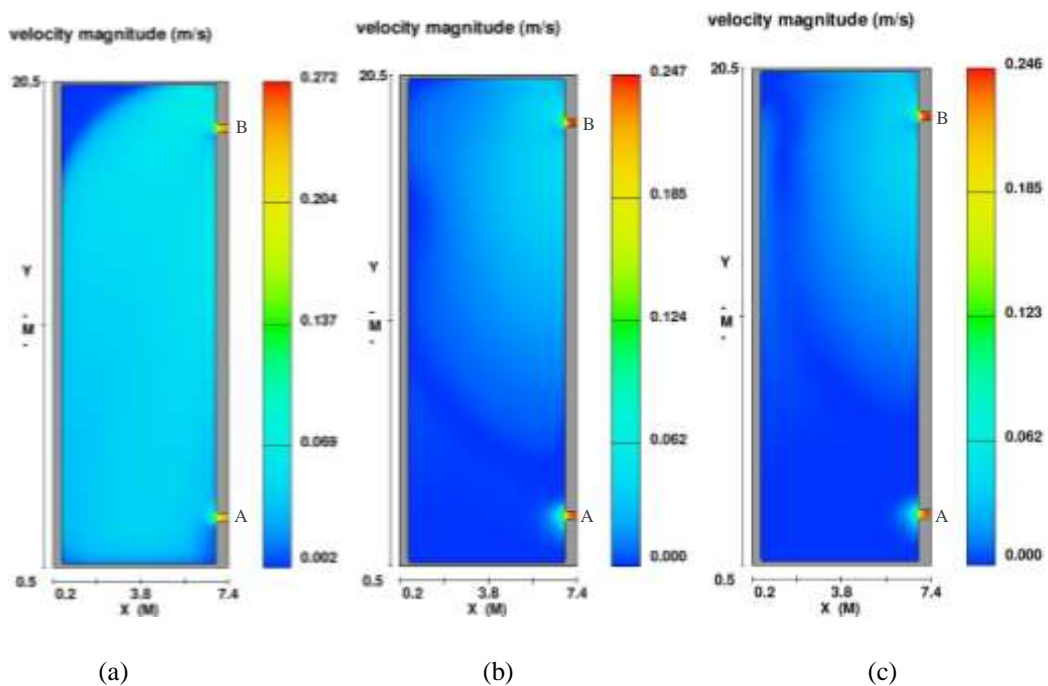


Figura 33. Velocidad en un plano horizontal a nivel de los orificios de salida (0.1 m sobre la solera) para un tamaño de malla de 0.4 m: (a) modelo laminar, (b) modelo  $k-\varepsilon$ , (c) modelo RNG  $k-\varepsilon$

En la Figura 34 se muestran los vectores de velocidad. Se observa una pequeña recirculación del flujo junto al primer muro para los modelos de turbulencia  $k-\varepsilon$  y RNG  $k-\varepsilon$ . El flujo de entrada impacta con el muro que separa la zona anaerobia de la anóxica y desciende hasta la salida B, donde el flujo que no es capaz de abandonar la cámara por esta salida circula próximo al segundo muro para alcanzar la salida A. Nuevamente el flujo que no abandona el dominio por la salida A impacta con la pared lateral y cambia de dirección propiciando la recirculación del flujo.

Como se adelantaba al mostrar los resultados obtenidos para el tiempo de retención hidráulico, la existencia de esta recirculación es la causa de la zona muerta que se presenta en las proximidades de la salida B.

La definición de zonas muertas es susceptible de diversas interpretaciones, existiendo diferentes criterios para su definición y localización en simulaciones CFD. Vesvikar & Al-Dahhan (2005) consideran como zona muerta todas aquellas regiones con una velocidad menor al 5% de la velocidad máxima. Varios autores han adoptado esta definición al analizar modelos CFD de digestores anaerobios (Bridgeman, 2012; Hurtado et al, 2015). Sin embargo, Wu & Chen (2008) modifican esta definición y señalan que las zonas muertas se localizan en regiones con velocidades inferiores a 0.001 m/s.

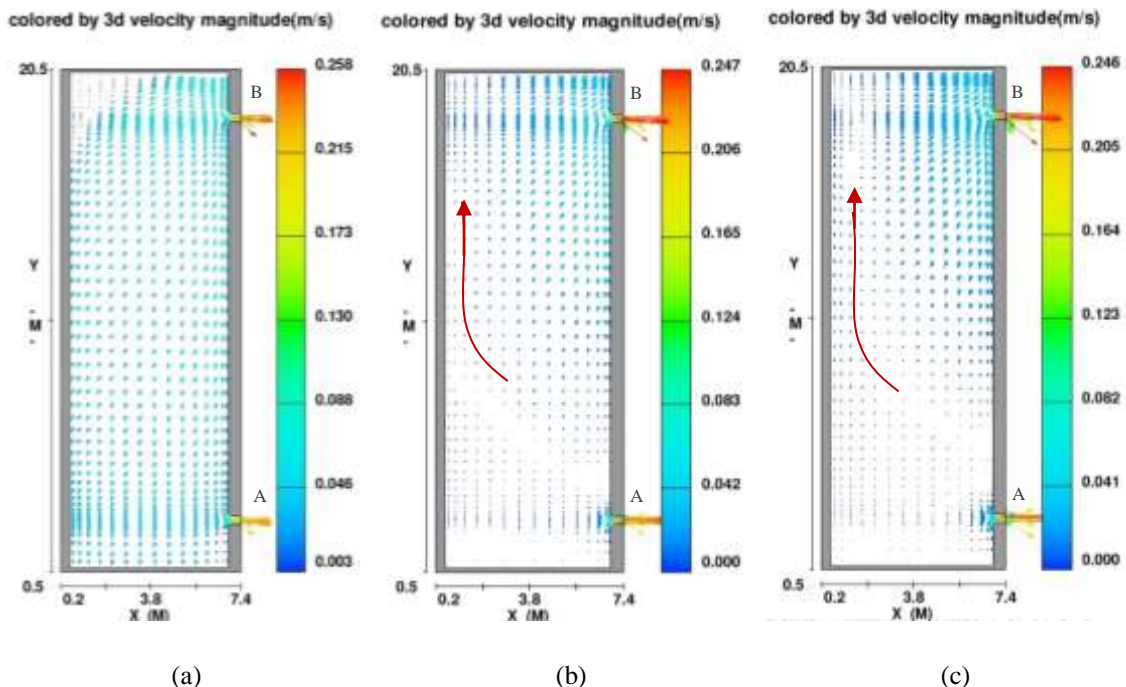


Figura 34. Vectores de velocidad en un plano horizontal a nivel de los orificios de salida (0.1 m sobre la solera) para un tamaño de malla de 0.4 m: (a) modelo laminar, (b) modelo  $k-\varepsilon$ , (c) modelo RNG  $k-\varepsilon$

### 7.1.3. Distancia recorrida por el fluido

En relación a la distancia recorrida por el fluido desde que ingresa a la cámara hasta su salida (Figura 35), se observa para todos los modelos de turbulencia que, al disminuir el tamaño de malla disminuye la distancia recorrida por el fluido antes de abandonar la cámara por la salida A y sin embargo aumenta la distancia recorrida antes de su salida por el orificio B.

Al comparar los distintos modelos se aprecia que el modelo laminar tiende a obtener las mayores distancias recorridas por el fluido antes de su salida por ambos orificios. Además, la diferencia entre los valores de distancia recorrida registrada en cada una de las salidas es más pronunciada. Por otro lado, los modelos de turbulencia  $k-\varepsilon$  y RNG  $k-\varepsilon$  calculan distancias recorridas por el fluido similares.

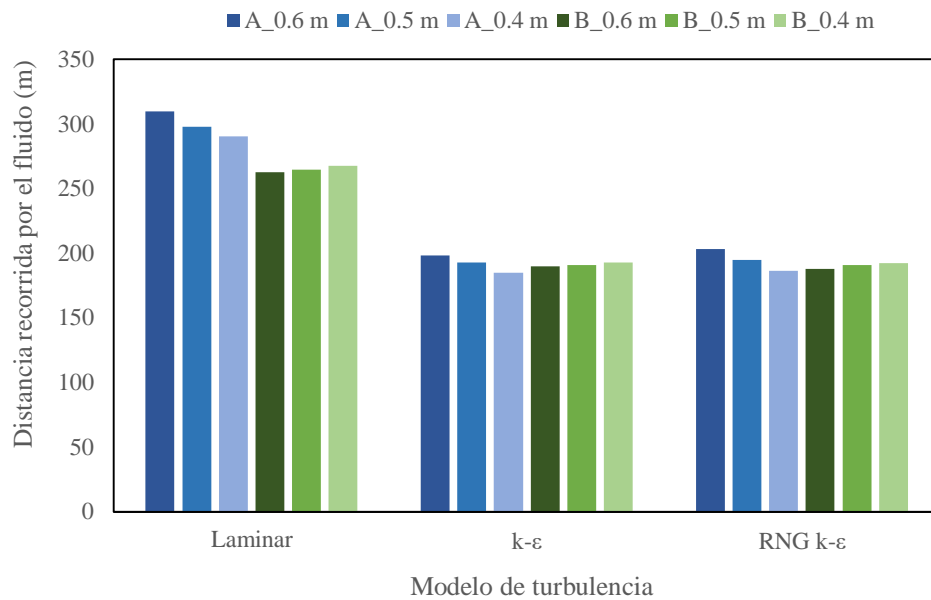


Figura 35. Distancia recorrida por el fluido registrada en las sondas ubicadas en los orificios de salida en función del tamaño de la malla y del modelo de turbulencia

Según la Figura 36, donde se muestra el error relativo de la distancia recorrida por el fluido calculada con los tamaños de malla más gruesos respecto al tamaño de malla más fino, el mayor error se obtiene con el tamaño de malla más grueso, en ambas salidas y para cualquier modelo de turbulencia, alcanzando un valor máximo en la salida A ligeramente superior a 9% y en la salida B de -2.4% con el modelo de turbulencia RNG  $k-\varepsilon$ . Para el tamaño de malla de 0.5 m, en la salida A el mayor error se encuentra con el modelo RNG  $k-\varepsilon$  de 4.7% y en la salida B con el modelo laminar de -1.07%.



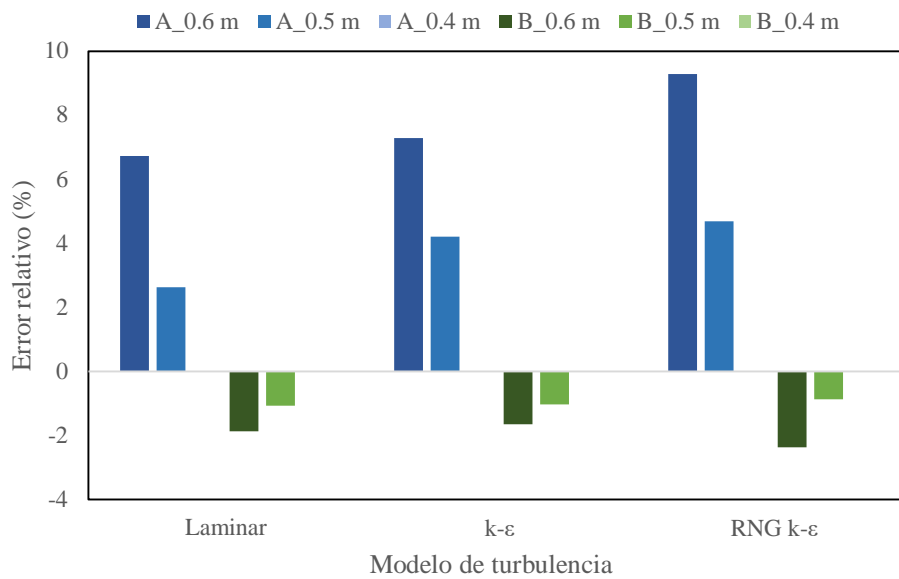


Figura 36. Error relativo de la distancia recorrida por el fluido, entre los distintos tamaños de malla, medida en las sondas ubicadas en los orificios de salida

En las tablas incluidas a continuación (Tablas 10, 11 y 12) se recoge el valor del índice de convergencia para cada modelo de turbulencia y según la salida considerada.

| Modelo Laminar      |               |          |                    |          |          |          |
|---------------------|---------------|----------|--------------------|----------|----------|----------|
| Tamaño de malla (m) | Distancia (m) |          | Error relativo (%) |          | GCI (%)  |          |
|                     | Salida A      | Salida B | Salida A           | Salida B | Salida A | Salida B |
| 0.6                 | 309.92        | 262.69   | -                  | -        | -        | -        |
| 0.5                 | 298.01        | 264.85   | 3.99               | -0.82    | 11.35    | 2.32     |
| 0.4                 | 290.38        | 267.70   | 2.63               | -1.06    | 5.84     | 2.37     |

Tabla 10. Índice de convergencia de la malla para la distancia recorrida por el fluido según un modelo laminar

| Modelo k-ε          |               |          |                    |          |          |          |
|---------------------|---------------|----------|--------------------|----------|----------|----------|
| Tamaño de malla (m) | Distancia (m) |          | Error relativo (%) |          | GCI (%)  |          |
|                     | Salida A      | Salida B | Salida A           | Salida B | Salida A | Salida B |
| 0.6                 | 198.50        | 189.83   | -                  | -        | -        | -        |
| 0.5                 | 192.80        | 191.01   | 2.96               | -0.61    | 8.41     | 1.75     |
| 0.4                 | 185.03        | 193.02   | 4.20               | -1.04    | 9.33     | 2.31     |

Tabla 11. Índice de convergencia de la malla para la distancia recorrida por el fluido según un modelo de turbulencia k-ε

| Modelo RNG $k-\varepsilon$ |               |          |                    |          |          |          |
|----------------------------|---------------|----------|--------------------|----------|----------|----------|
| Tamaño de malla (m)        | Distancia (m) |          | Error relativo (%) |          | GCI (%)  |          |
|                            | Salida A      | Salida B | Salida A           | Salida B | Salida A | Salida B |
| 0.6                        | 203.46        | 187.98   | -                  | -        | -        | -        |
| 0.5                        | 194.89        | 190.84   | 4.40               | -1.50    | 12.51    | 4.25     |
| 0.4                        | 186.18        | 192.53   | 4.68               | -0.88    | 10.40    | 1.96     |

Tabla 12. Índice de convergencia de la malla para la distancia recorrida por el fluido según un modelo de turbulencia RNG  $k-\varepsilon$

Se puede comprobar que al emplear un modelo laminar el GCI disminuye en la salida A al introducir un refinamiento de la malla, sin embargo, aumenta ligeramente en la salida B. Con el modelo  $k-\varepsilon$  este índice experimenta un aumento en ambas salidas. Por el contrario, el modelo RNG  $k-\varepsilon$  logra una disminución del GCI en ambas salidas al disminuir el tamaño de la malla logrando aproximarse al valor asintótico.

Como se muestra en la Figura 37, el fluido recorre mayor distancia cuando se encuentra en una zona muerta dada la recirculación experimentada por el flujo.

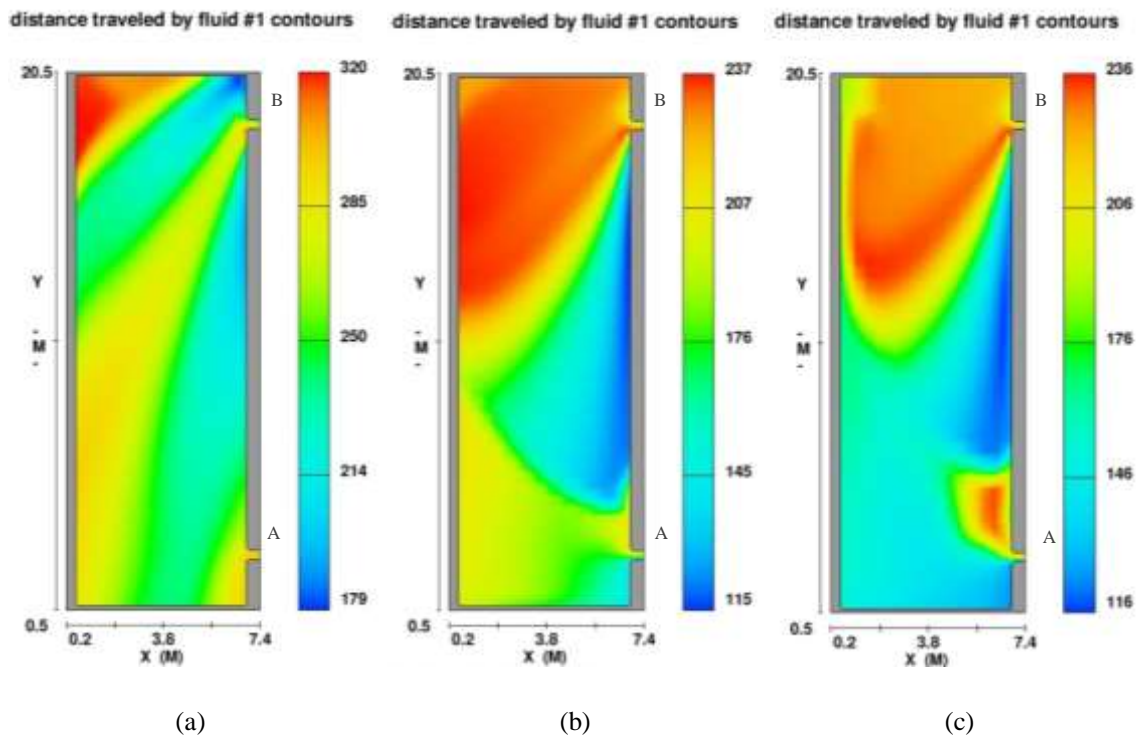


Figura 37. Distancia recorrida por el fluido en un plano horizontal a nivel de los orificios de salida (0.1 m sobre la solera) para un tamaño de malla de 0.4 m: (a) modelo laminar, (b) modelo  $k-\varepsilon$ , (c) modelo RNG  $k-\varepsilon$

## 7.2. Análisis de resultados en el interior de la cámara anaerobia

En este apartado se han analizado los valores de determinadas variables registradas por sondas ubicadas en la zona central de la cámara y a distintas alturas. Se han seleccionado dos niveles comprendidos entre las salidas y la entrada de la cámara (0.75 m y 2 m sobre la solera) y otros dos entre la entrada y la superficie libre (3.25 m y 4.5 m sobre la solera).

En la Figura 38 se proporcionan distintas vistas para conocer la localización de las sondas empleadas en esta sección y de las cuales se extraerán los resultados. En la figura, la entrada a la cámara viene indicada en azul, mientras que las salidas se muestran en color rojo. Como podemos comprobar, tenemos un conjunto de sondas ubicadas en una posición cercana a la salida A (Anaerobio 2A), otras en el centro de la cámara (Anaerobio 2B), mientras que el resto se sitúan próximas a la salida B (Anaerobio 2C).

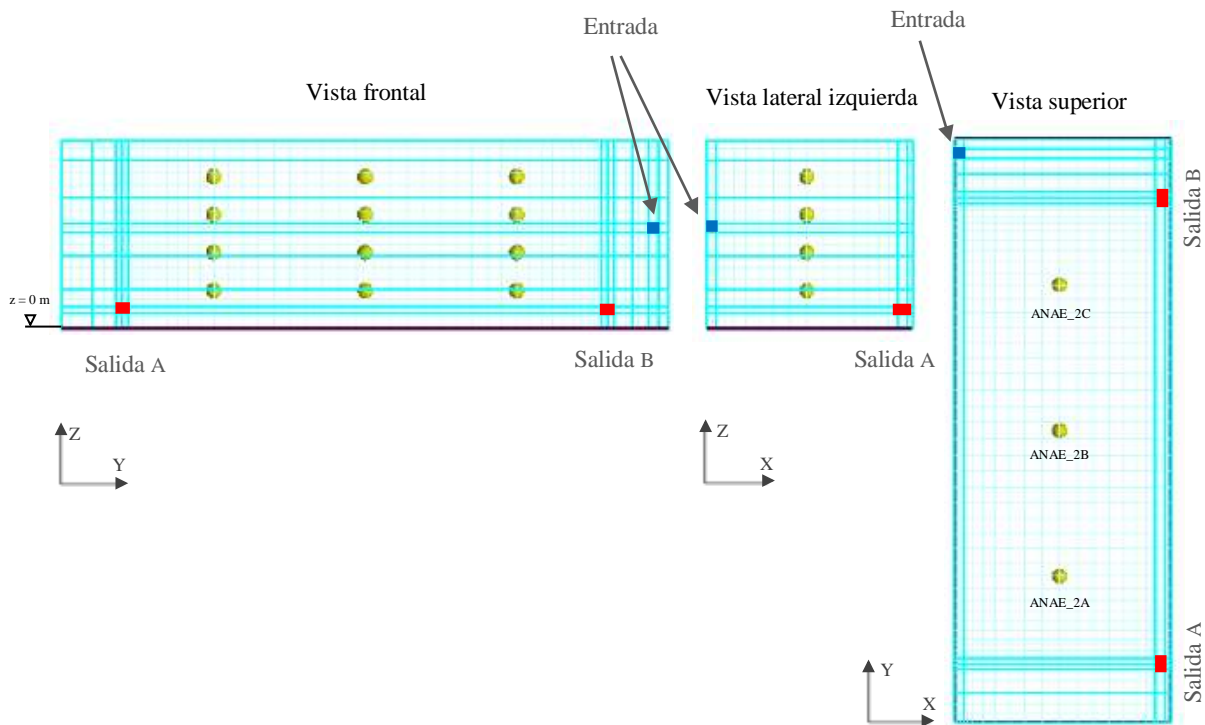


Figura 38. Ubicación de las sondas empleadas para el análisis del interior de la cámara

### 7.2.1. Tiempo de retención hidráulico

En la Figura 39 se presentan los valores del tiempo de retención hidráulico (TRH) registrados por las sondas Anaerobio 2A. Esto permite comparar los modelos de turbulencia y conocer la influencia que el tamaño de malla ejerce sobre los resultados a distintas alturas de la cámara.

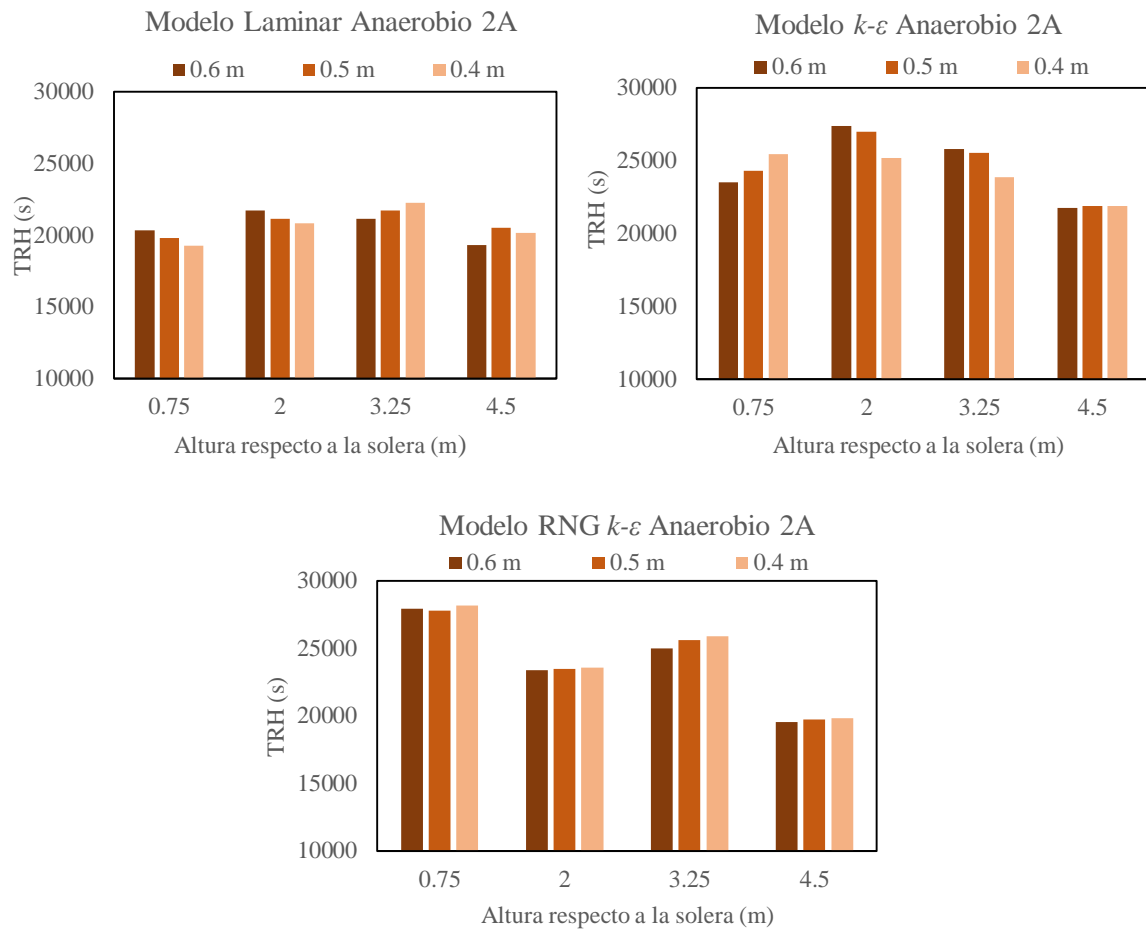


Figura 39. Tiempo de retención hidráulico en las sondas Anaerobio 2A a distintas alturas según el modelo de turbulencia y el tamaño de malla

En vista de los resultados mostrados por las gráficas anteriores, el modelo laminar proporciona los valores de TRH más bajos, excepto a una altura de 5 m y para los tamaños de malla más finos. El modelo  $k-\epsilon$  calcula el mayor TRH en el nivel analizado inmediatamente inferior a la entrada (2 m) y en el nivel más próximo a la lámina libre (4.5 m) en relación al resto de modelos. En cambio, el modelo RNG  $k-\epsilon$  considera que el mayor TRH tendría lugar a una altura ligeramente superior al nivel de las salidas (0.75 m).

La influencia del tamaño de malla es distinta en cada nivel. En el modelo RNG  $k-\epsilon$  la variación del tamaño de malla presenta menor influencia. En el nivel más próximo a las salidas, la disminución del tamaño de malla: reduce el TRH en el modelo laminar, aumenta el TRH en el modelo  $k-\epsilon$ , mientras que el modelo RNG  $k-\epsilon$  presenta el mayor TRH para el tamaño de malla más fino. A 2 m sobre la solera la reducción del tamaño de malla continúa disminuyendo el TRH en el modelo laminar y también lo hace en el modelo  $k-\epsilon$ . Por el contrario, en el modelo RNG  $k-\epsilon$  una disminución del tamaño de

malla aumenta ligeramente el TRH. Ya en un nivel superior al de la entrada (3.25 m), el modelo laminar y el modelo RNG  $k-\varepsilon$  ven aumentar el TRH al disminuir el tamaño de malla mientras que en el modelo  $k-\varepsilon$  el TRH disminuye. En el último nivel, el modelo laminar obtiene el mayor TRH para un tamaño de malla de 0.5 m y es el modelo  $k-\varepsilon$  y el RNG  $k-\varepsilon$  los que tienden a aumentar el TRH al refinar la malla.

En la Figura 40 se muestra el error relativo del tiempo de retención hidráulico calculado con los tamaños de malla más gruesos respecto al de la malla más fina.

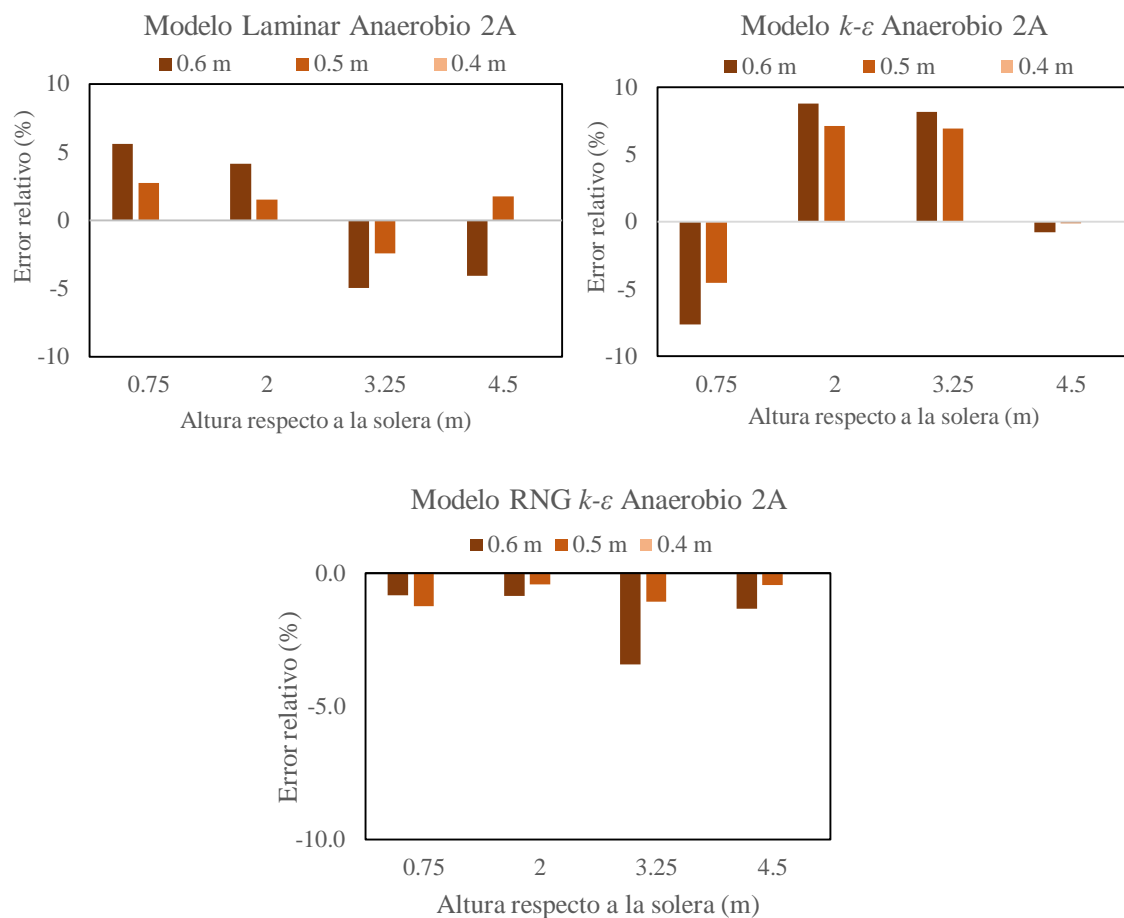


Figura 40. Error relativo del tiempo de retención hidráulico entre los distintos tamaños de malla en las sondas Anaerobio 2A

Se observa que, para todos los modelos y alturas, excepto para el modelo RNG  $k-\varepsilon$  a 0.75 m sobre la solera, el tamaño de malla más grueso es el que obtiene resultados más distantes a los obtenidos con el tamaño más fino y, por tanto, le corresponde un mayor error. Del mismo modo, cabe destacar que de forma general el modelo  $k-\varepsilon$  tiende a alcanzar mayores errores.

En el caso de emplear un modelo laminar, el tamaño de malla más grueso presenta errores positivos en los dos primeros niveles, alcanzando un error ligeramente superior al 5.6% a 0.75 m sobre la solera y, negativos en los otros dos niveles, obteniendo un máximo de -5% a 3.25 m. Al emplear un tamaño de malla de 0.5 m se reduce dicho porcentaje de error. Se mantiene el error positivo en los dos primeros niveles a los que se les suma el nivel situado a 4.5 m sobre la solera que pasa a presentar un error positivo frente al error negativo obtenido con el tamaño de malla superior. Nuevamente, es a 0.75 m donde el cálculo genera el mayor error siendo de 2.75% en este caso. A 3.25 m sobre la solera el tiempo de retención hidráulico sigue siendo subestimado con un error negativo de -2.5%.

Siguiendo con el modelo  $k-\epsilon$ , este obtiene valores del tiempo de retención inferiores a los obtenidos con un tamaño de malla de 0.4 m a 0.75 m sobre la solera y a 4.5 m, aunque en este último nivel el error es de pequeña magnitud e inferior al -1% se llega a alcanzar un error de -7.6% en el primer nivel. En cuanto a los dos niveles centrales, el error es positivo al sobreestimar el tiempo de retención y llega al 8.8%.

Finalmente, con el modelo RNG  $k-\epsilon$  se reduce el error relativo al emplear tamaños de malla más gruesos. En todos los niveles el tiempo de retención es subestimado siendo el error máximo de -3.4% con el tamaño de malla de 0.6 m a 3.25 m y de -1.25% con el tamaño de malla de 0.5 m a 0.75 m sobre a solera.

Considerando el índice de convergencia de la malla, se comprueba que al reducir el tamaño de malla un 25%, pasando de un tamaño de 0.5 m a 0.4 m, los modelos laminar y RNG  $k-\epsilon$  obtienen soluciones que se aproxima al valor asintótico en la mayoría de los casos (Tablas 13 y 15). En contraposición, con el modelo  $k-\epsilon$ , no se logra la convergencia de los resultados al aumentar la resolución de la malla. El índice GCI aumenta su valor a excepción del correspondiente al punto situado a 4.5 m de la solera (Tabla 14).

| Modelo Laminar      |         |       |        |       |         |      |        |       |
|---------------------|---------|-------|--------|-------|---------|------|--------|-------|
| Tamaño de malla (m) | TRH (s) |       |        |       | GCI (%) |      |        |       |
|                     | 0.75 m  | 2 m   | 3.25 m | 4.5 m | 0.75 m  | 2 m  | 3.25 m | 4.5 m |
| 0.6                 | 20345   | 21712 | 21162  | 19340 | -       | -    | -      | -     |
| 0.5                 | 19795   | 21164 | 21717  | 20516 | 7.89    | 7.36 | 7.26   | 16.29 |
| 0.4                 | 19264   | 20846 | 22262  | 20160 | 6.12    | 3.38 | 5.44   | 3.93  |

Tabla 13. Índice de convergencia de la malla para el tiempo de retención hidráulico en las sondas Anaerobio 2A según un modelo laminar

| Modelo $k-\varepsilon$ |         |       |        |       |         |       |        |       |
|------------------------|---------|-------|--------|-------|---------|-------|--------|-------|
| Tamaño de malla (m)    | TRH (s) |       |        |       | GCI (%) |       |        |       |
|                        | 0.75 m  | 2 m   | 3.25 m | 4.5 m | 0.75 m  | 2 m   | 3.25 m | 4.5 m |
| 0.6                    | 23517   | 27407 | 25829  | 21758 | -       | -     | -      | -     |
| 0.5                    | 24315   | 26992 | 25543  | 21903 | 9.32    | 4.37  | 3.18   | 1.88  |
| 0.4                    | 25463   | 25190 | 23880  | 21930 | 10.02   | 15.89 | 15.47  | 0.27  |

Tabla 14. Índice de convergencia de la malla para el tiempo de retención hidráulico en las sondas Anaerobio 2A según un modelo  $k-\varepsilon$

| Modelo RNG $k-\varepsilon$ |         |       |        |       |         |      |        |       |
|----------------------------|---------|-------|--------|-------|---------|------|--------|-------|
| Tamaño de malla (m)        | TRH (s) |       |        |       | GCI (%) |      |        |       |
|                            | 0.75 m  | 2 m   | 3.25 m | 4.5 m | 0.75 m  | 2 m  | 3.25 m | 4.5 m |
| 0.6                        | 27905   | 23374 | 24990  | 19535 | -       | -    | -      | -     |
| 0.5                        | 27791   | 23476 | 25603  | 19712 | 1.17    | 1.23 | 6.81   | 2.56  |
| 0.4                        | 28141   | 23575 | 25881  | 19800 | 2.77    | 0.94 | 2.39   | 0.98  |

Tabla 15. Índice de convergencia de la malla para el tiempo de retención hidráulico en las sondas Anaerobio 2A según un modelo RNG  $k-\varepsilon$

En la Figura 41 entramos a analizar los resultados para el TRH de las sondas Anaerobio 2B a distintas alturas. Esta sonda se sitúa en la mitad de la cámara (Ver Figura 38).

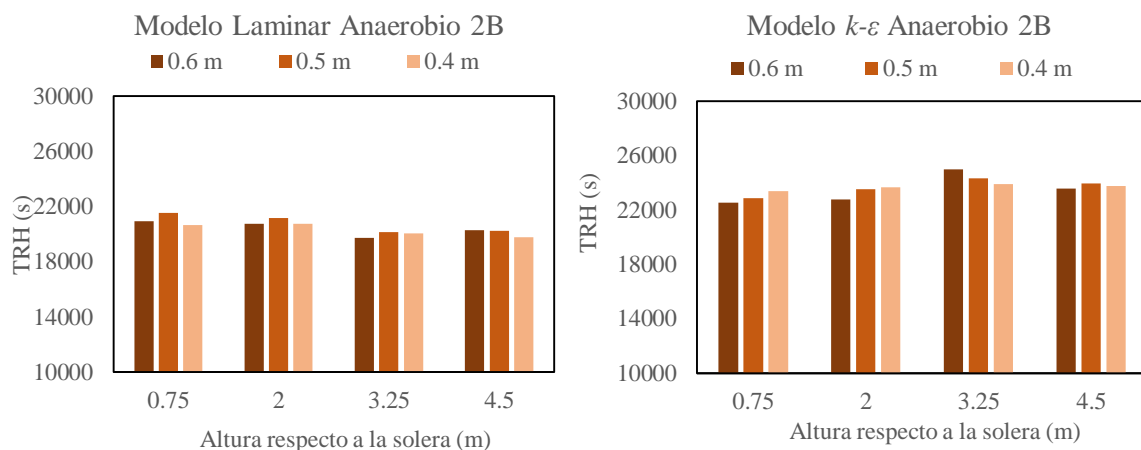


Figura 41. Tiempo de retención hidráulico en las sondas Anaerobio 2B a distintas alturas según el modelo de turbulencia y el tamaño de malla

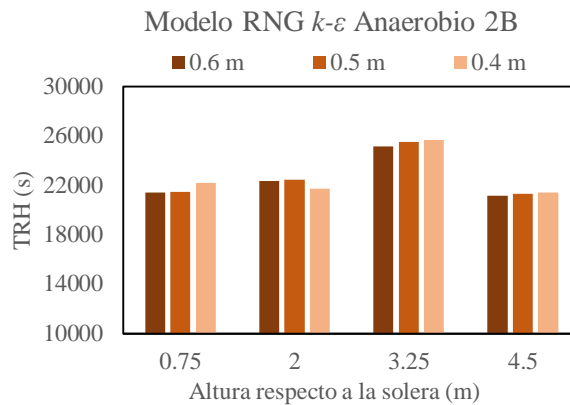


Figura 41 (cont.). Tiempo de retención hidráulico en las sondas Anaerobio 2B a distintas alturas según el modelo de turbulencia y el tamaño de malla

Nuevamente el régimen laminar registra los valores más bajos del TRH. El modelo RNG  $k-\varepsilon$  presenta el mayor valor del TRH para 3.25 m y, sin embargo, para el resto de alturas es el modelo  $k-\varepsilon$  el que proporciona mayor TRH.

En el modelo laminar no está clara la influencia del tamaño de malla, si bien es el tamaño de 0.5 m el que obtiene el mayor TRH en los tres niveles inferiores. En el modelo  $k-\varepsilon$  en los niveles ubicados por debajo de la entrada al disminuir el tamaño de malla aumenta el TRH, pero a una altura ligeramente superior a la entrada se invierte la influencia del tamaño de malla consiguiéndose la disminución del TRH al refinar la malla. En el nivel próximo a la superficie libre (4.5 m) el tamaño de 0.5 m obtiene mayor TRH. Por último, con el modelo RNG  $k-\varepsilon$  el TRH tiende a aumentar al disminuir el tamaño de malla excepto para el tamaño de malla más fino a 2 m de altura.

Al aumentar la altura respecto a la solera, de forma general se presenta una disminución del TRH para el modelo laminar y, para el modelo  $k-\varepsilon$  y RNG  $k-\varepsilon$  el tiempo crece hasta un nivel situado por encima de la entrada y luego disminuye a medida que nos aproximamos a la lámina libre.

El error relativo del tiempo de retención hidráulico calculado con los tamaños de malla más gruesos respecto al obtenido con la malla más fina para las sondas Anaerobio 2B, se muestra en la Figura 42.

En cualquier caso, el error es inferior a  $\pm 5\%$ . Cuando se emplea un modelo  $k-\varepsilon$  el tamaño de malla de 0.6 m obtiene mayor error a cualquier altura, sin embargo, con un modelo laminar un tamaño de malla de 0.6 m presenta mayor error en los dos niveles superiores mientras que el tamaño de malla de 0.5 m obtiene el mayor error en los dos primeros niveles. Con el modelo RNG  $k-\varepsilon$ , el tamaño de malla de 0.6 m es el de mayor error excepto en uno de los niveles.



Con el modelo laminar, el tamaño de malla de 0.5 m tiende a sobreestimar el valor del TRH, mientras que la malla más gruesa sobreestima el TRH en los niveles extremos y subestima en la zona central de la cámara. El máximo error positivo tiene lugar con el tamaño de malla de 0.5 m a 0.75 m sobre la solera y es de un 4.3%. Por el contrario, el máximo error negativo se alcanza con un tamaño de malla de 0.6 m a 3.25 m sobre la solera y es de valor -1.7%.

Para un modelo  $k-\epsilon$ , el tamaño de malla de 0.6 m subestima el TRH excepto a un nivel de 3.25 m sobre la solera, mientras que el tamaño de 0.5 m subestima en los dos primeros niveles y sobreestima en los dos siguientes. Tanto el máximo error positivo como el negativo se experimentan con el tamaño de malla de 0.6 m y toman valores de 4.5% y -3.7% respectivamente.

Con el modelo RNG  $k-\epsilon$ , ambos tamaños de malla subestiman el TRH en todos los niveles excepto a 2 m sobre la solera. Los máximos errores se obtienen para los dos primeros niveles, donde en el primero el error es de -3.5% y en el segundo de 3.4%.

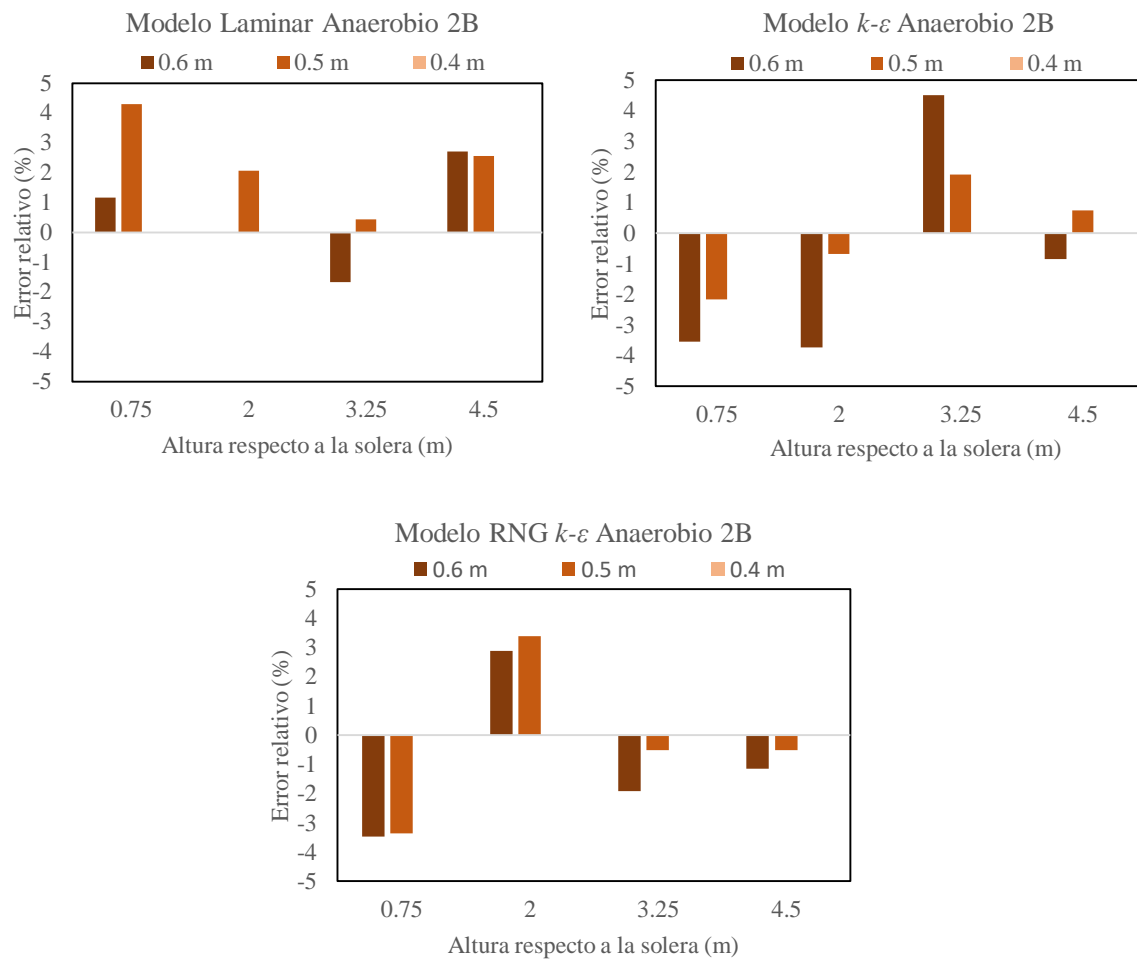


Figura 42. Error relativo del tiempo de retención hidráulico entre los distintos tamaños de malla en las sondas Anaerobio 2B

Evaluando el grado de convergencia de los resultados mediante el índice de convergencia de la malla (Tablas 16, 17 y 18), se comprueba que para el primer nivel situado a 0.75 m de la solera, el refinamiento de la malla supone un aumento del indicador con independencia del modelo de turbulencia considerado. A 2 m de la solera se logra reducir la banda de error para el régimen laminar y el modelo  $k-\varepsilon$ , siendo este último el que más se aproxima a su valor asintótico al aumentar la resolución de la malla. En cuanto al comportamiento del modelo RNG  $k-\varepsilon$ , este continúa sin converger en este nivel. Por el contrario, a 3.25 m todos los modelos obtienen valores del TRH que tienden a aproximarse al asintótico, aspecto que se mantiene a 4.5 m para los modelos  $k-\varepsilon$  y RNG  $k-\varepsilon$ .

| Modelo Laminar      |         |       |        |       |         |      |        |       |
|---------------------|---------|-------|--------|-------|---------|------|--------|-------|
| Tamaño de malla (m) | TRH (s) |       |        |       | GCI (%) |      |        |       |
|                     | 0.75 m  | 2 m   | 3.25 m | 4.5 m | 0.75 m  | 2 m  | 3.25 m | 4.5 m |
| 0.6                 | 20917   | 20741 | 19731  | 20293 | -       | -    | -      | -     |
| 0.5                 | 21563   | 21167 | 20153  | 20264 | 8.51    | 5.72 | 5.95   | 0.41  |
| 0.4                 | 20675   | 20741 | 20039  | 19759 | 9.55    | 4.56 | 0.94   | 5.68  |

Tabla 16. Índice de convergencia de la malla para el tiempo de retención hidráulico en las sondas Anaerobio 2B según un modelo laminar

| Modelo $k-\varepsilon$ |         |       |        |       |         |      |        |       |
|------------------------|---------|-------|--------|-------|---------|------|--------|-------|
| Tamaño de malla (m)    | TRH (s) |       |        |       | GCI (%) |      |        |       |
|                        | 0.75 m  | 2 m   | 3.25 m | 4.5 m | 0.75 m  | 2 m  | 3.25 m | 4.5 m |
| 0.6                    | 22533   | 22785 | 24962  | 23572 | -       | -    | -      | -     |
| 0.5                    | 22854   | 23510 | 24344  | 23950 | 3.99    | 8.76 | 7.21   | 4.48  |
| 0.4                    | 23359   | 23670 | 23884  | 23773 | 4.81    | 1.50 | 4.28   | 1.65  |

Tabla 17. Índice de convergencia de la malla para el tiempo de retención hidráulico en las sondas Anaerobio 2B según un modelo  $k-\varepsilon$

| Modelo RNG $k-\varepsilon$ |         |       |        |       |         |      |        |       |
|----------------------------|---------|-------|--------|-------|---------|------|--------|-------|
| Tamaño de malla (m)        | TRH (s) |       |        |       | GCI (%) |      |        |       |
|                            | 0.75 m  | 2 m   | 3.25 m | 4.5 m | 0.75 m  | 2 m  | 3.25 m | 4.5 m |
| 0.6                        | 21437   | 22363 | 25156  | 21159 | -       | -    | -      | -     |
| 0.5                        | 21464   | 22471 | 25513  | 21295 | 0.36    | 1.36 | 3.98   | 1.82  |
| 0.4                        | 22210   | 21735 | 25648  | 21405 | 7.46    | 7.52 | 1.16   | 1.14  |

Tabla 18. Índice de convergencia de la malla para el tiempo de retención hidráulico en las sondas Anaerobio 2B según un modelo RNG  $k-\varepsilon$

A continuación, se investiga el TRH en las sondas Anaerobio 2C a distintas alturas y su variación según el modelo de turbulencia y el tamaño de malla (Figura 43). Se trata de las sondas más próximas a la entrada.

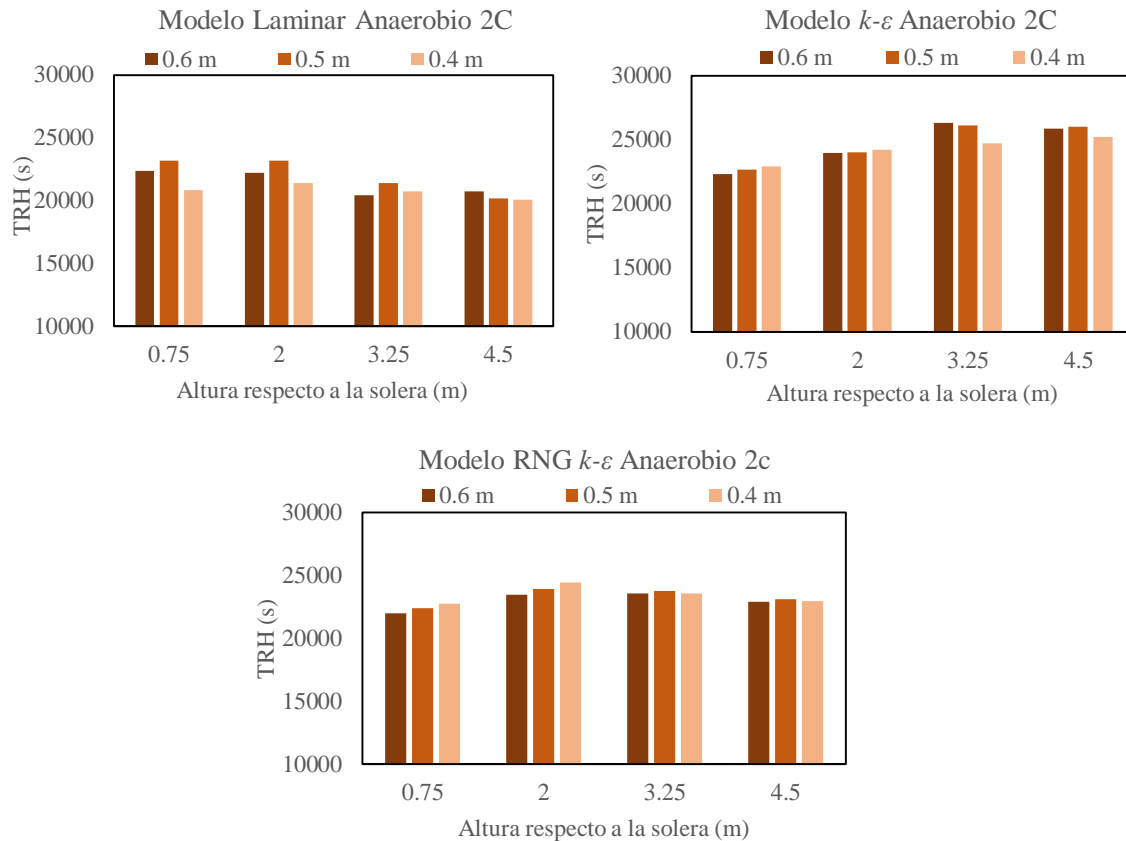


Figura 43. Tiempo de retención hidráulico en las sondas Anaerobio 2C a distintas alturas según el modelo de turbulencia y el tamaño de malla

De las gráficas anteriores se desprende que al aumentar la altura sobre la solera la tendencia general es: una disminución del TRH para el modelo laminar y un aumento para el modelo  $k-\epsilon$ . En el modelo RNG  $k-\epsilon$  el tiempo aumenta en los niveles situados por debajo de la entrada y disminuye por encima de la misma.

Si acudimos a un modelo laminar, el tamaño de malla de 0.5 m ofrece el mayor TRH en los tres primeros niveles. En los dos niveles inferiores, para el modelo  $k-\epsilon$  y RNG  $k-\epsilon$ , el TRH es inversamente proporcional al tamaño de malla, de modo que al disminuir el tamaño de malla aumenta el TRH. Por encima de la entrada, el modelo  $k-\epsilon$  registra menor TRH con el tamaño de malla más fino, y en el modelo RNG  $k-\epsilon$  el tamaño de malla de 0.5 m tiende a presentar mayor TRH.

Al comparar los modelos de turbulencia, se observa que el modelo  $k-\epsilon$  obtiene un valor superior del TRH para los dos niveles superiores y el modelo laminar registra el mayor valor de TRH en el primer nivel con los tamaños de malla más gruesos.

En la Figura 44 se presenta el error relativo del tiempo de retención hidráulico calculado con los tamaños de malla más gruesos respecto al obtenido con la malla más fina para las sondas Anaerobio 2C.

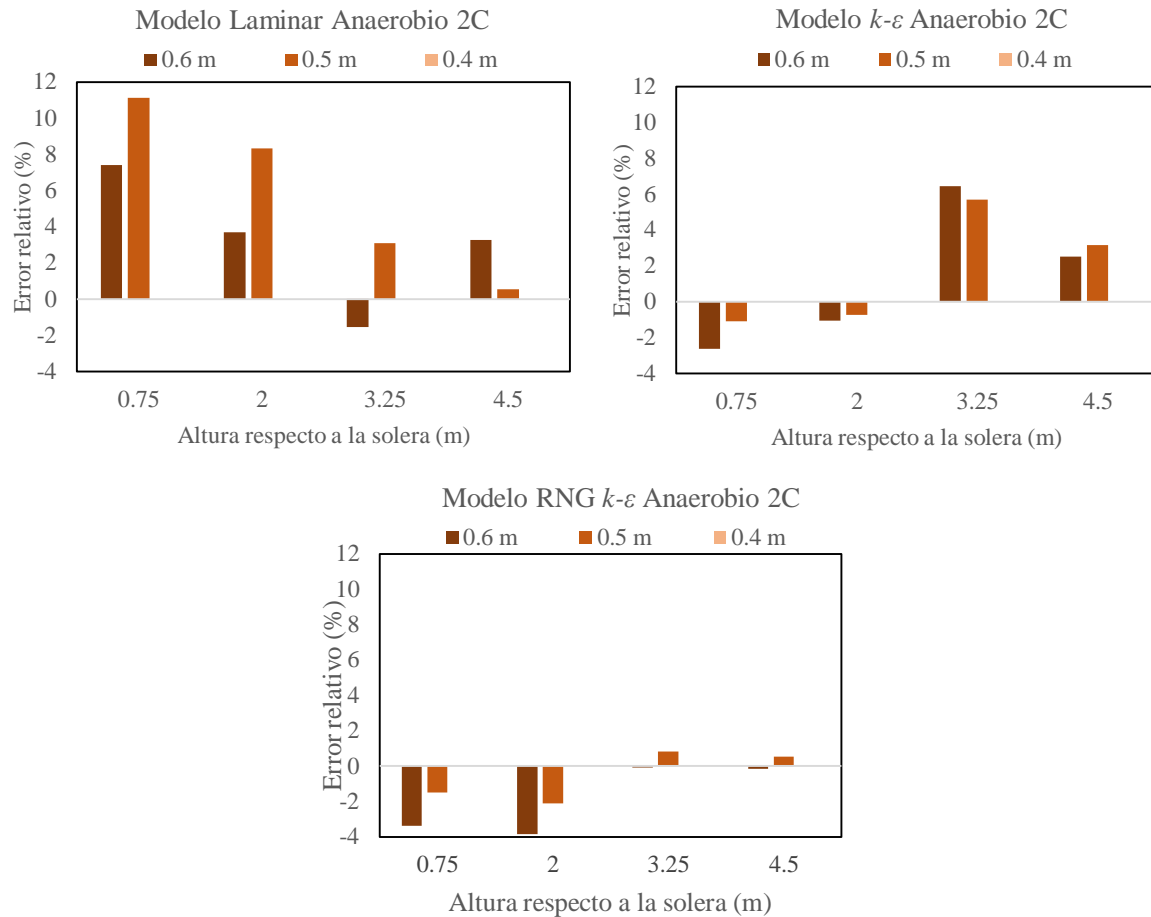


Figura 44. Error relativo del tiempo de retención hidráulico entre los distintos tamaños de malla en las sondas Anaerobio 2C

El modelo laminar, de manera general, tiende a sobreestimar el valor del TRH y, es el valor calculado con el tamaño de malla de 0.5 m el que presenta mayor error respecto al valor obtenido con la malla más fina, el cual es considerado como referencia. El error máximo se encuentra entorno al 11%. Con el modelo  $k-\varepsilon$  se obtienen errores negativos en los dos primeros niveles y positivos en los dos restantes, el error máximo en ambos casos se alcanza con el tamaño de malla de 0.6 m y toma valores de -2.6% y 6.4% respectivamente. En cuanto al empleo de un modelo RNG  $k-\varepsilon$ , el tamaño de malla más grueso tiende a subestimar el valor del TRH mientras que el tamaño de malla de 0.5 m subestima en los dos primeros niveles y sobreestima en los dos superiores. El máximo error negativo es de -3.8% para un tamaño de malla de 0.6 m y el positivo es inferior al 1% para un tamaño de malla de 0.5 m.

Según el índice de convergencia de la malla, en el primer nivel únicamente el modelo  $k-\varepsilon$  logra la convergencia de los resultados, presentando el resto de modelos un valor elevado del GCI al reducir el tamaño de la malla (Tablas 19, 20, 21). Por el contrario, a 3.25 m y 4.5 m, los modelos laminar y RNG  $k-\varepsilon$  experimentan una reducción del indicador, siendo los resultados correspondientes al último nivel los más próximos al valor asintótico. A 2 m de la solera, el modelo RNG  $k-\varepsilon$  consigue reducir ligeramente el GCI pero a pesar de ello, el modelo  $k-\varepsilon$  continúa presentando la menor banda de error para el TRH.

| Modelo Laminar      |         |       |        |       |         |       |        |       |
|---------------------|---------|-------|--------|-------|---------|-------|--------|-------|
| Tamaño de malla (m) | TRH (s) |       |        |       | GCI (%) |       |        |       |
|                     | 0.75 m  | 2 m   | 3.25 m | 4.5 m | 0.75 m  | 2 m   | 3.25 m | 4.5 m |
| 0.6                 | 22389   | 22201 | 20417  | 20729 | -       | -     | -      | -     |
| 0.5                 | 23164   | 23191 | 21379  | 20183 | 9.51    | 12.12 | 12.78  | 7.69  |
| 0.4                 | 20841   | 21409 | 20738  | 20073 | 24.77   | 18.49 | 6.86   | 1.22  |

Tabla 19. Índice de convergencia de la malla para el tiempo de retención hidráulico en las sondas Anaerobio 2C según un modelo laminar

| Modelo $k-\varepsilon$ |         |       |        |       |         |      |        |       |
|------------------------|---------|-------|--------|-------|---------|------|--------|-------|
| Tamaño de malla (m)    | TRH (s) |       |        |       | GCI (%) |      |        |       |
|                        | 0.75 m  | 2 m   | 3.25 m | 4.5 m | 0.75 m  | 2 m  | 3.25 m | 4.5 m |
| 0.6                    | 22313   | 23965 | 26342  | 25873 | -       | -    | -      | -     |
| 0.5                    | 22663   | 24042 | 26157  | 26032 | 4.39    | 0.91 | 2.01   | 1.74  |
| 0.4                    | 22913   | 24216 | 24749  | 25235 | 2.43    | 1.60 | 12.64  | 7.02  |

Tabla 20. Índice de convergencia de la malla para el tiempo de retención hidráulico en las sondas Anaerobio 2C según un modelo  $k-\varepsilon$

| Modelo RNG $k-\varepsilon$ |         |       |        |       |         |      |        |       |
|----------------------------|---------|-------|--------|-------|---------|------|--------|-------|
| Tamaño de malla (m)        | TRH (s) |       |        |       | GCI (%) |      |        |       |
|                            | 0.75 m  | 2 m   | 3.25 m | 4.5 m | 0.75 m  | 2 m  | 3.25 m | 4.5 m |
| 0.6                        | 21958   | 23476 | 23549  | 22918 | -       | -    | -      | -     |
| 0.5                        | 22392   | 23893 | 23758  | 23077 | 5.50    | 4.96 | 2.51   | 1.96  |
| 0.4                        | 22730   | 24413 | 23568  | 22957 | 30.31   | 4.73 | 1.80   | 1.17  |

Tabla 21. Índice de convergencia de la malla para el tiempo de retención hidráulico en las sondas Anaerobio 2C según un modelo RNG  $k-\varepsilon$

A propósito de los resultados expuestos, se muestran distribuciones del TRH en planos horizontales a distintos niveles según el modelo de turbulencia empleado y para el tamaño de malla más fino (Figuras 45, 46 y 47). Del mismo modo, es posible visualizar diversos cortes longitudinales de la cámara anaerobia para conocer la ubicación de las zonas de máximos y mínimos valores de TRH en planos verticales (Figuras 48, 49 y 50).

La distribución del tiempo de retención hidráulico es similar para los modelos de turbulencia  $k-\varepsilon$  y RNG  $k-\varepsilon$  (Figura 45), aunque esto no se mantiene para el resto de niveles (Figura 46 y 47). El tiempo de retención hidráulico medio para esta primera cámara se encuentra entorno a las 6-7 horas. En relación a los cortes longitudinales, se puede considerar que existe cierta similitud en la distribución de zonas muertas para los modelos de turbulencia  $k-\varepsilon$  y RNG  $k-\varepsilon$ , por lo que se mantendría el comportamiento observado con anterioridad.

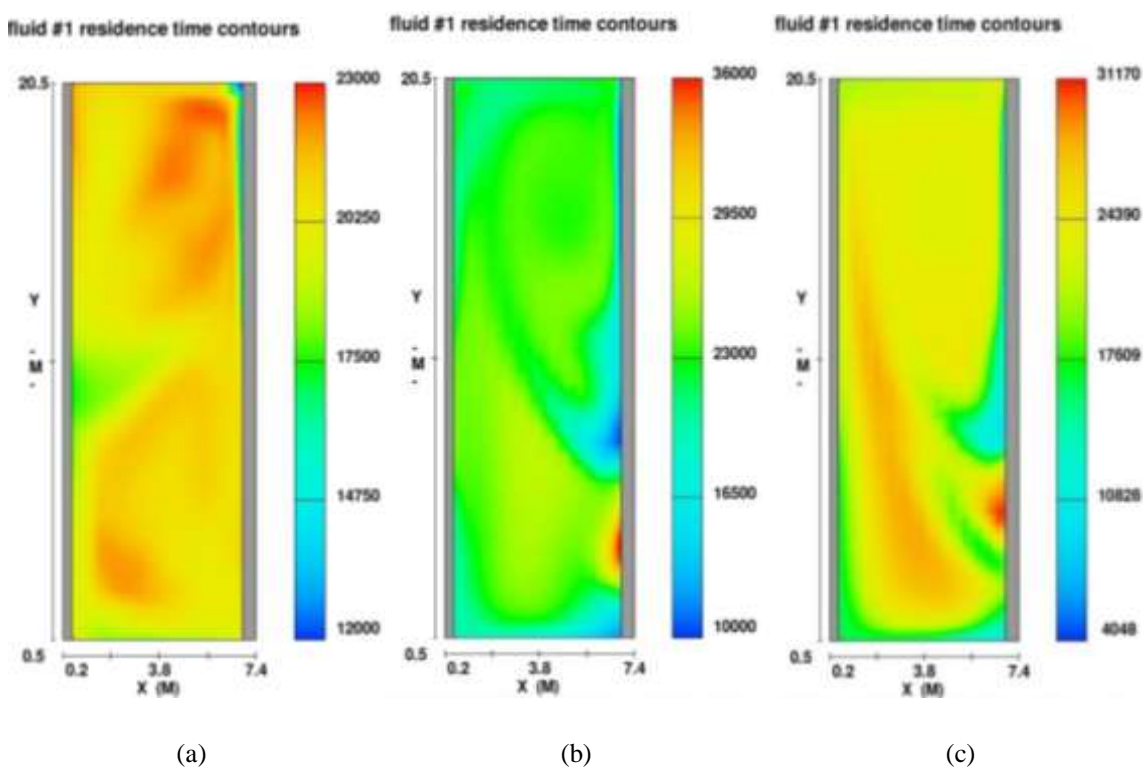


Figura 45. Tiempo de retención hidráulico en un plano horizontal intermedio entre las salidas y la entrada (1.5 m sobre la solera) para un tamaño de malla de 0.4 m: (a) modelo laminar, (b) modelo  $k-\varepsilon$  y (c) modelo RNG  $k-\varepsilon$

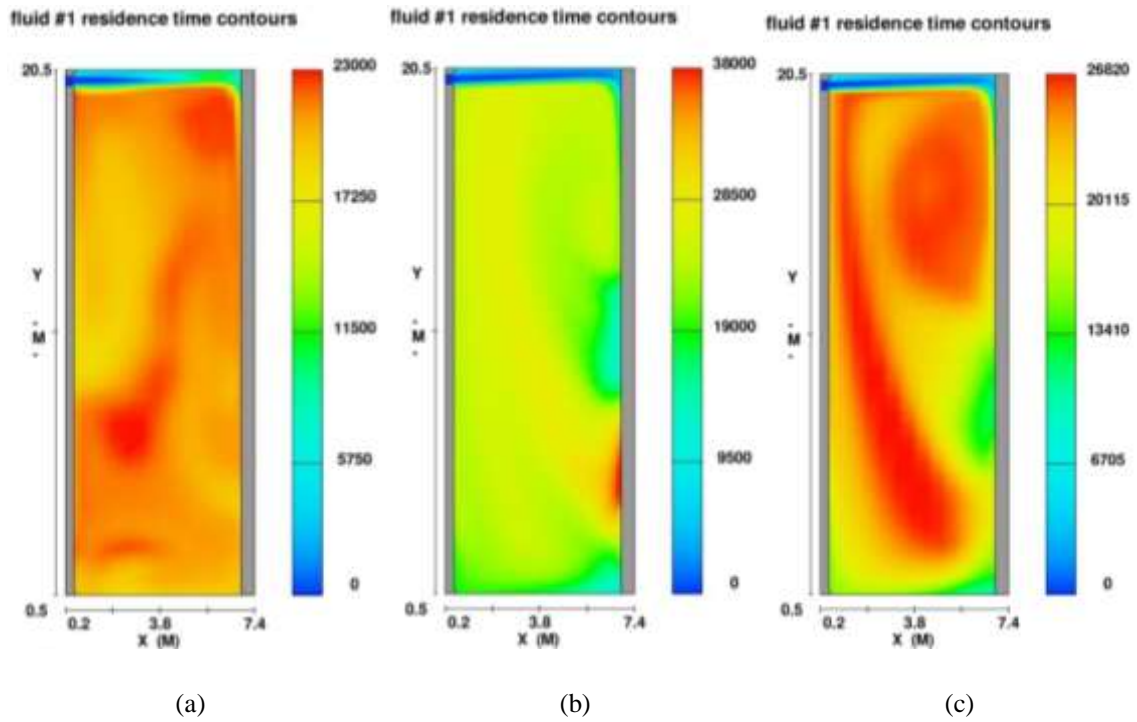


Figura 46. Tiempo de retención hidráulico en un plano horizontal a nivel de la entrada (2.8 m sobre la solera) para un tamaño de malla de 0.4 m: (a) modelo laminar, (b) modelo  $k-\epsilon$  y (c) modelo RNG  $k-\epsilon$

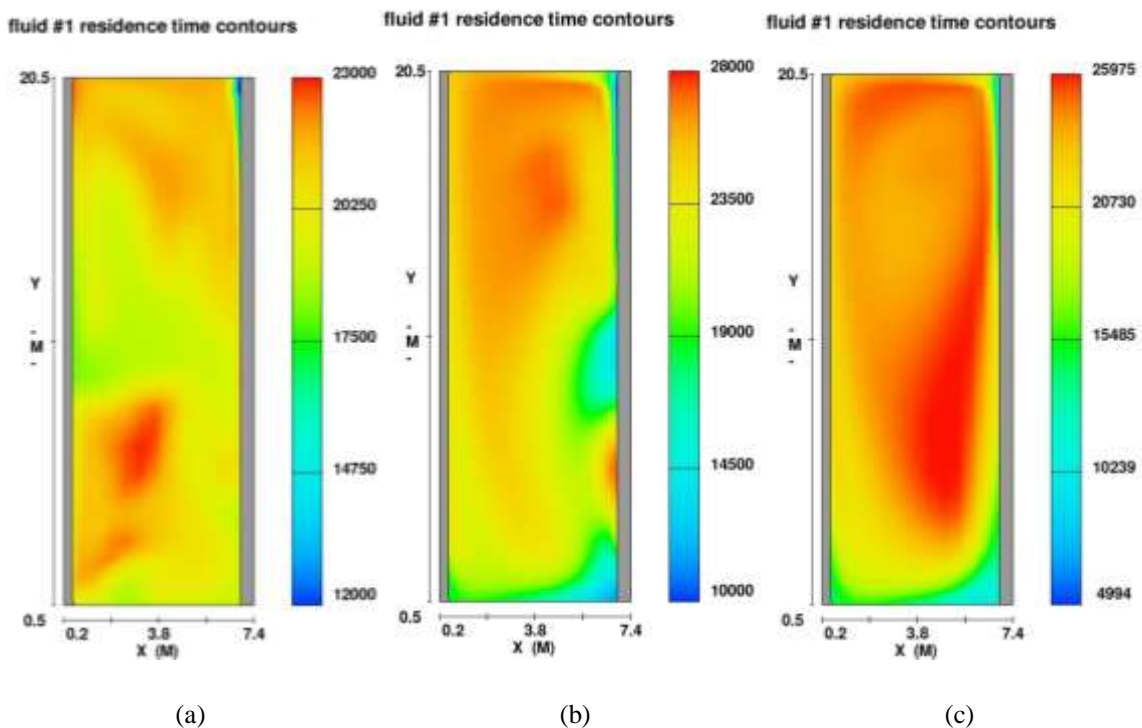


Figura 47. Tiempo de retención hidráulico en un plano horizontal entre la entrada y la superficie libre (3.5 m sobre la solera) para un tamaño de malla de 0.4 m: (a) modelo laminar, (b) modelo  $k-\epsilon$  y (c) modelo RNG  $k-\epsilon$

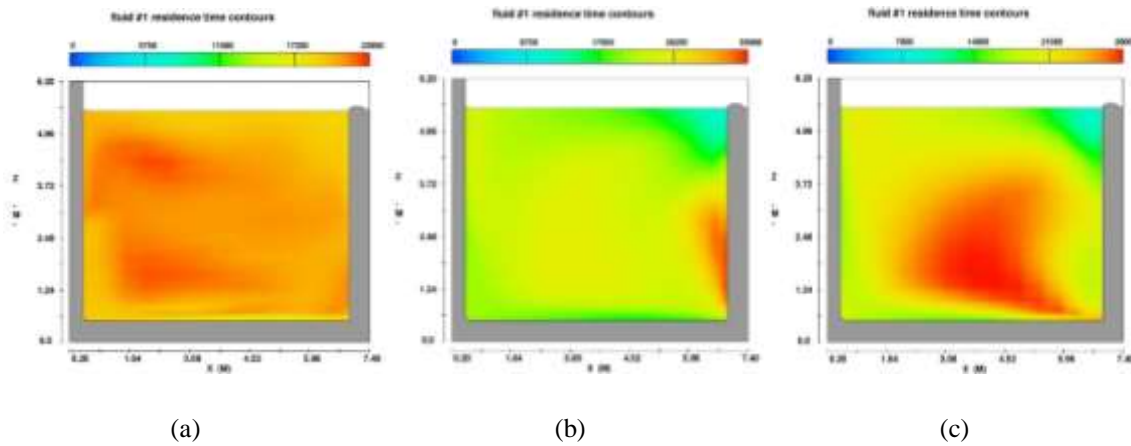


Figura 48. Tiempo de retención hidráulico en un plano longitudinal a 2.5 m de la pared exterior para un tamaño de malla de 0.4 m: (a) modelo laminar, (b) modelo  $k-\epsilon$  y (c) modelo RNG  $k-\epsilon$

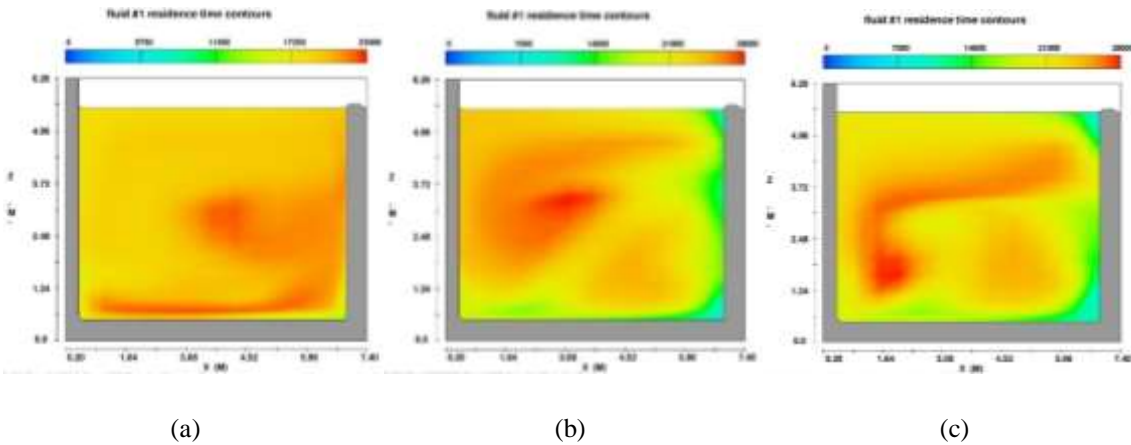


Figura 49. Tiempo de retención hidráulico en un plano longitudinal a mitad de la cámara para un tamaño de malla de 0.4 m: (a) modelo laminar, (b) modelo  $k-\epsilon$  y (c) modelo RNG  $k-\epsilon$

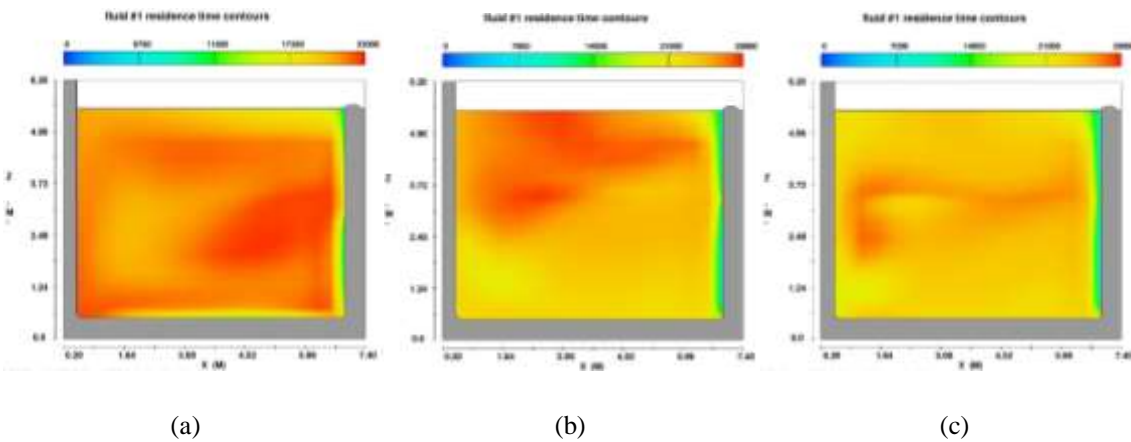


Figura 50. Tiempo de retención hidráulico en un plano longitudinal a 2.5 m de la pared interior para un tamaño de malla de 0.4 m: (a) modelo laminar, (b) modelo  $k-\epsilon$  y (c) modelo RNG  $k-\epsilon$



### 7.2.2. Velocidad del fluido

También es posible conocer la variación de la velocidad en altura teniendo en cuenta los resultados obtenidos en las sondas descritas anteriormente. La Figura 51 refleja dicha variación en las sondas Anaerobio 2A.

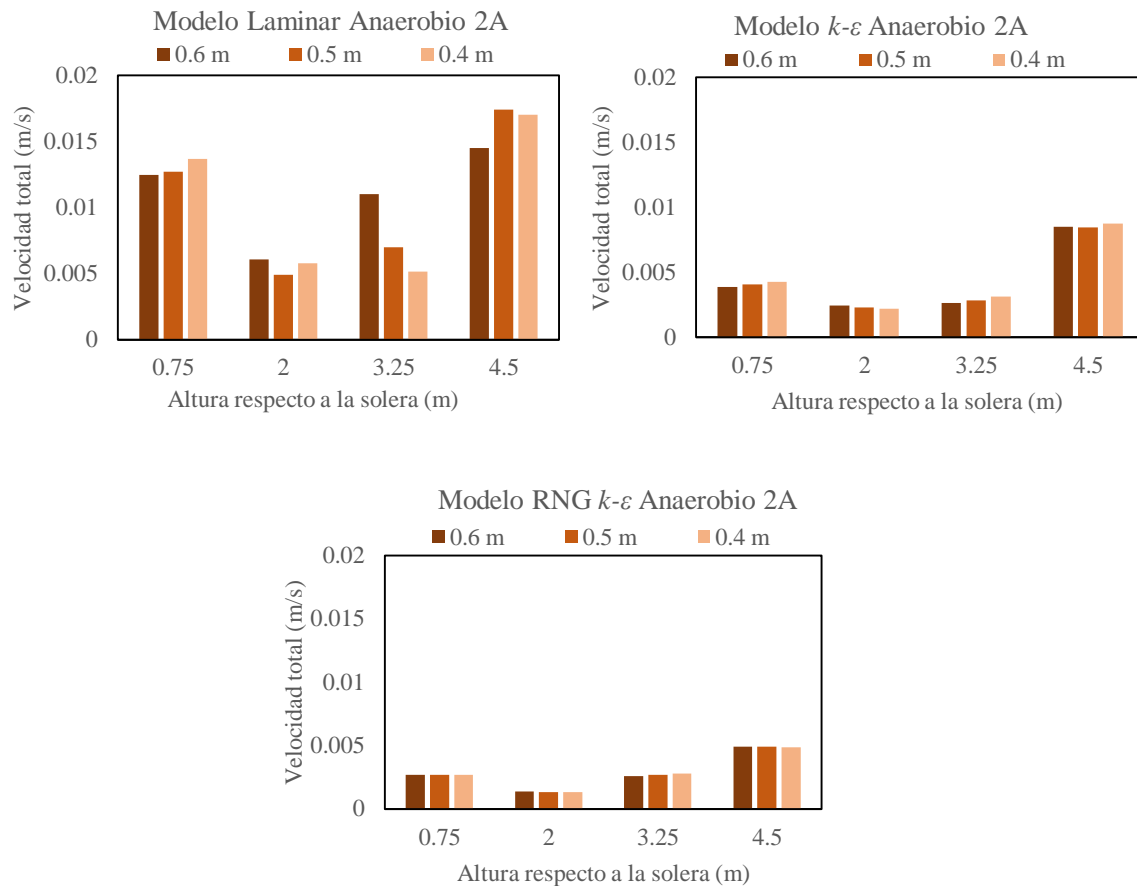


Figura 51. Velocidad en las sondas Anaerobio 2A a distintas alturas según el modelo de turbulencia y el tamaño de malla

Como se observa, el modelo laminar tiende a obtener una velocidad superior a la registrada en el resto de modelos, siendo el modelo RNG  $k-\epsilon$  el que experimenta una velocidad más reducida.

La influencia del tamaño de malla es más significativa en el modelo laminar. En este caso y para el primer nivel analizado, se manifiesta un aumento de la velocidad al refinar la malla. Sin embargo, en el resto de escenarios la situación es distinta. A 2 m sobre la solera, el tamaño de malla más fino adquiere un valor intermedio entre el máximo y el mínimo valor de la velocidad registrada a este nivel, para un tamaño de malla de 0.6 m y 0.5 m respectivamente. En el siguiente nivel, ya por encima de la entrada a la cámara, la velocidad se vuelve directamente proporcional al tamaño de

malla por lo que la reducción del tamaño de malla lleva asociada una disminución de la velocidad experimentada por el flujo. En el nivel superior, la mayor velocidad se logra con el empleo de un tamaño de malla de 0.5 m.

Cuando se emplea un modelo  $k-\varepsilon$ , se consigue un aumento de la velocidad al reducir el tamaño de malla en todos los niveles excepto a 2 m sobre la solera donde se observa el caso contrario. Para un modelo RNG  $k-\varepsilon$ , en el primer nivel el tamaño de malla de 0.5 m es el que proporciona la mayor velocidad, en el siguiente y en el último nivel la velocidad disminuye al disminuir el tamaño de malla y, por último, a 3.25 m sobre la solera la velocidad aumenta con la disminución del tamaño de malla.

De forma general, la máxima velocidad se registra en el nivel superior para los tres modelos de turbulencia. La influencia que la variación de altura ejerce sobre la velocidad es similar en ellos, generándose un aumento de la velocidad en el nivel inferior y superior mientras que en los niveles intermedios la velocidad es más reducida.

Tras hallar el error relativo de la velocidad calculada con los tamaños de malla más gruesos respecto a la obtenida con el tamaño de malla más fino, se han generado las gráficas que se muestran a continuación (Figura 52).

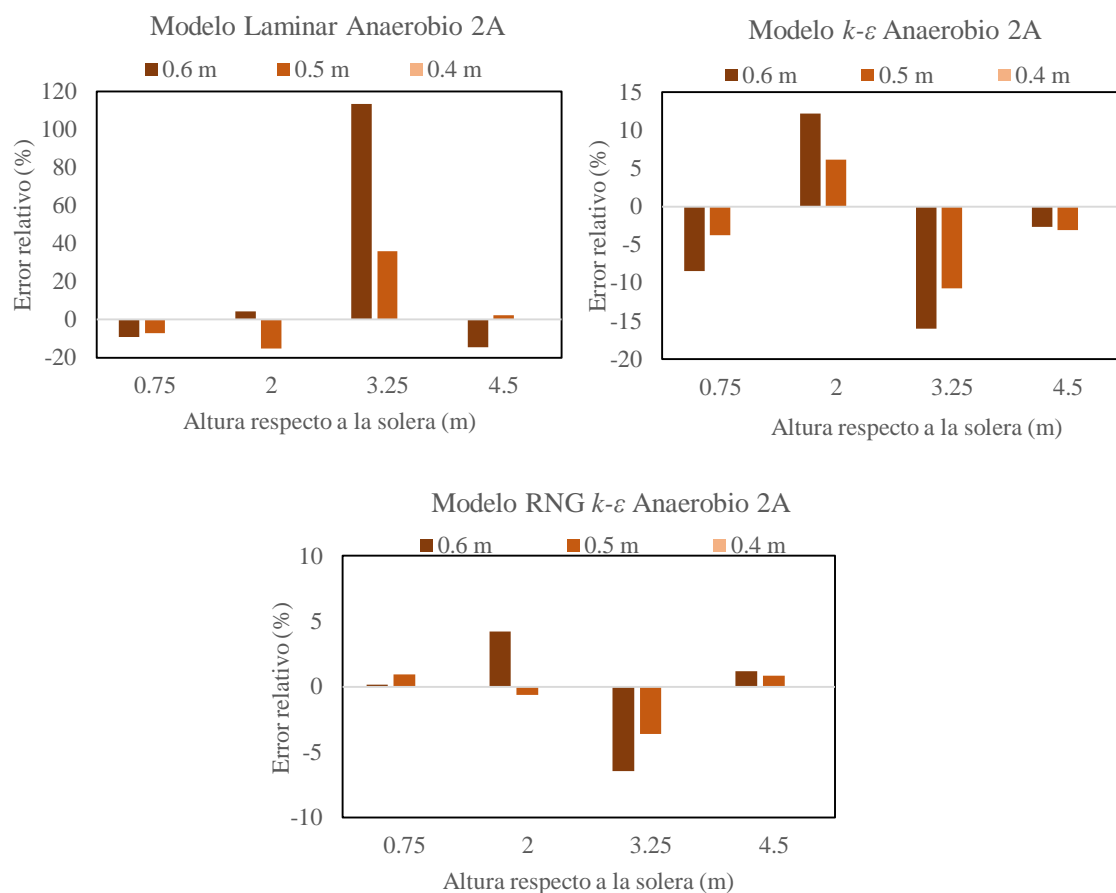


Figura 52. Error relativo de la velocidad entre los distintos tamaños de malla en las sondas Anaerobio 2A

De los errores obtenidos se comprueba que el mayor error se genera en el cálculo de la velocidad en los niveles centrales. Además, según el modelo de turbulencia, el empleo del modelo laminar implica la consecución de errores de gran magnitud, mientras que estos errores se reducen considerablemente al seleccionar un modelo RNG  $k-\epsilon$ . Si atendemos ahora a criterios como el tamaño de malla, por lo general, la velocidad obtenida por el tamaño de malla más grueso se aleja en mayor medida de la calculada con el tamaño de malla más fino.

Para un modelo laminar a un nivel de 3.25 m sobre la solera y para un tamaño de malla de 0.6 m, el error es de un 113%, siendo este el máximo error positivo generado. En cuanto a los errores negativos se alcanzan valores de hasta un -15%. Con el modelo  $k-\epsilon$  el error oscila entre 12 y -16% y para un modelo RNG  $k-\epsilon$  se encontraría entre 4 y -6.5% aproximadamente.

Teniendo en cuenta los elevados valores correspondientes al índice de convergencia de la malla para el caso de un modelo laminar, podemos considerar que su empleo resulta menos recomendado. Esto se constata, además, en el estudio del error relativo. El modelo RNG  $k-\epsilon$  permite la convergencia de los resultados al aumentar la resolución de la malla en la mayoría de niveles, presentando menor amplitud de la banda de error que el resto de modelos (Tablas 22, 23, 24).

| Modelo Laminar      |                 |       |        |       |         |       |        |       |
|---------------------|-----------------|-------|--------|-------|---------|-------|--------|-------|
| Tamaño de malla (m) | Velocidad (m/s) |       |        |       | GCI (%) |       |        |       |
|                     | 0.75 m          | 2 m   | 3.25 m | 4.5 m | 0.75 m  | 2 m   | 3.25 m | 4.5 m |
| 0.6                 | 0.012           | 0.006 | 0.011  | 0.015 | -       | -     | -      | -     |
| 0.5                 | 0.013           | 0.005 | 0.007  | 0.017 | 5.96    | 65.63 | 162.10 | 47.28 |
| 0.4                 | 0.014           | 0.006 | 0.005  | 0.017 | 15.82   | 33.76 | 79.71  | 5.39  |

Tabla 22. Índice de convergencia de la malla para la velocidad en las sondas Anaerobio 2A según un modelo laminar

| Modelo $k-\epsilon$ |                 |       |        |       |         |       |        |       |
|---------------------|-----------------|-------|--------|-------|---------|-------|--------|-------|
| Tamaño de malla (m) | Velocidad (m/s) |       |        |       | GCI (%) |       |        |       |
|                     | 0.75 m          | 2 m   | 3.25 m | 4.5 m | 0.75 m  | 2 m   | 3.25 m | 4.5 m |
| 0.6                 | 0.004           | 0.002 | 0.003  | 0.009 | -       | -     | -      | -     |
| 0.5                 | 0.004           | 0.002 | 0.003  | 0.008 | 13.81   | 16.25 | 16.78  | 1.14  |
| 0.4                 | 0.004           | 0.002 | 0.003  | 0.009 | 8.44    | 13.61 | 23.83  | 6.88  |

Tabla 23. Índice de convergencia de la malla para la velocidad en las sondas Anaerobio 2A según un modelo  $k-\epsilon$

| Modelo RNG $k-\varepsilon$ |                 |       |        |       |         |       |        |       |
|----------------------------|-----------------|-------|--------|-------|---------|-------|--------|-------|
| Tamaño de malla (m)        | Velocidad (m/s) |       |        |       | GCI (%) |       |        |       |
|                            | 0.75 m          | 2 m   | 3.25 m | 4.5 m | 0.75 m  | 2 m   | 3.25 m | 4.5 m |
| 0.6                        | 0.003           | 0.001 | 0.003  | 0.005 | -       | -     | -      | -     |
| 0.5                        | 0.003           | 0.001 | 0.003  | 0.005 | 2.25    | 13.83 | 8.29   | 0.97  |
| 0.4                        | 0.003           | 0.001 | 0.003  | 0.005 | 2.09    | 1.34  | 8.04   | 1.88  |

Tabla 24. Índice de convergencia de la malla para la velocidad en las sondas Anaerobio 2A según un modelo RNG  $k-\varepsilon$

Siguiendo con el análisis de las sondas Anaerobio 2B, los resultados de velocidad obtenidos se muestran en la Figura 53.

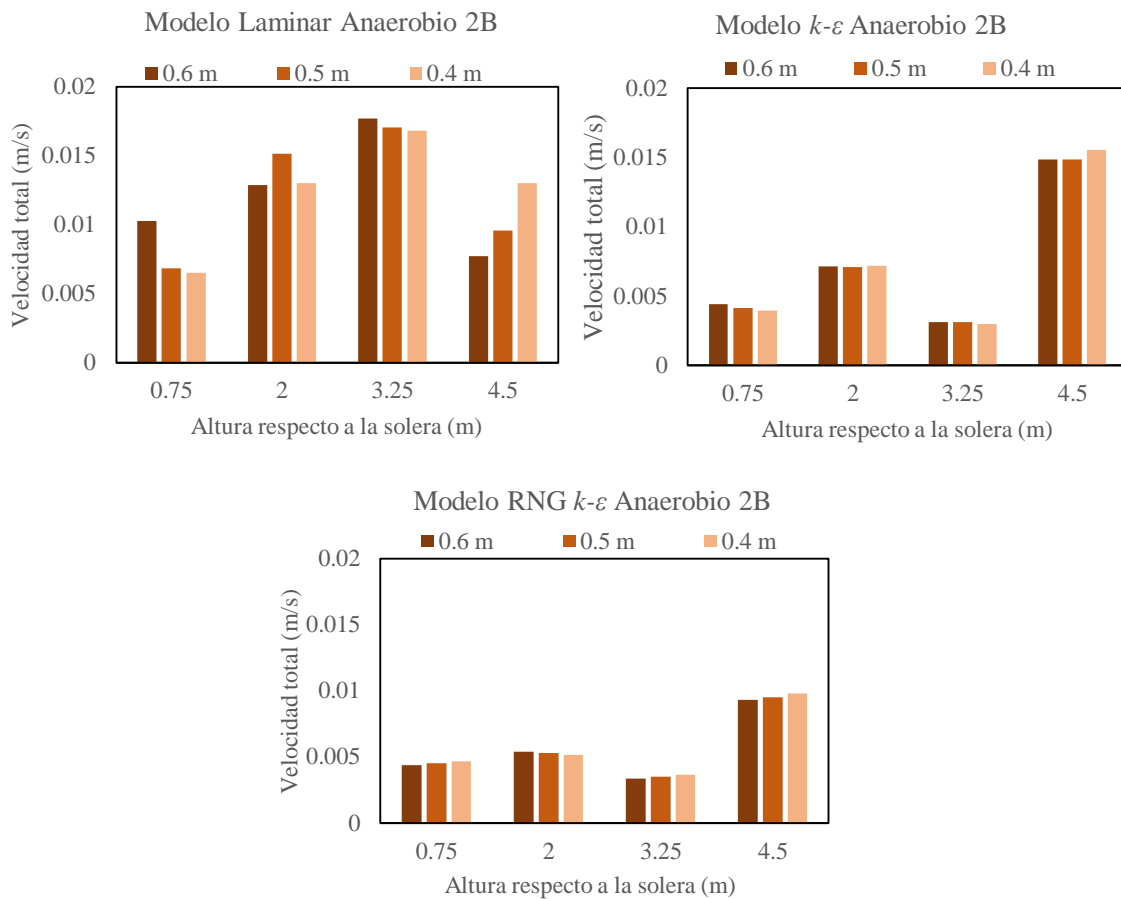


Figura 53. Velocidad en las sondas Anaerobio 2B a distintas alturas según el modelo de turbulencia y el tamaño de malla

Tal y como ocurría en las sondas Anaerobio 2A, el modelo laminar desarrolla velocidades de mayor magnitud a las manifestadas por el resto de modelos, siendo el modelo RNG  $k-\varepsilon$  el que experimenta la menor velocidad.

Para el primer nivel y para el nivel situado a 3.25 m sobre la solera, tanto en el modelo laminar como en el modelo  $k-\varepsilon$ , una reducción del tamaño de malla se traduce en una disminución de la velocidad, al contrario de lo observado para el modelo RNG  $k-\varepsilon$ . Sin embargo, todos coinciden en que, en el nivel superior, el refinamiento de la malla conlleva un aumento de la velocidad del flujo.

En cuanto a la variación de la velocidad en función de la altura sobre la solera del punto considerado, el efecto es similar cuando se trabaja con modelos de turbulencia  $k-\varepsilon$  y RNG  $k-\varepsilon$ . Por el contrario, el modelo laminar desarrolla mayores velocidades en los niveles intermedios.

En la siguiente figura queda recogido el error relativo de la velocidad en las sondas Anaerobio 2B en función del tamaño de malla (Figura 54).

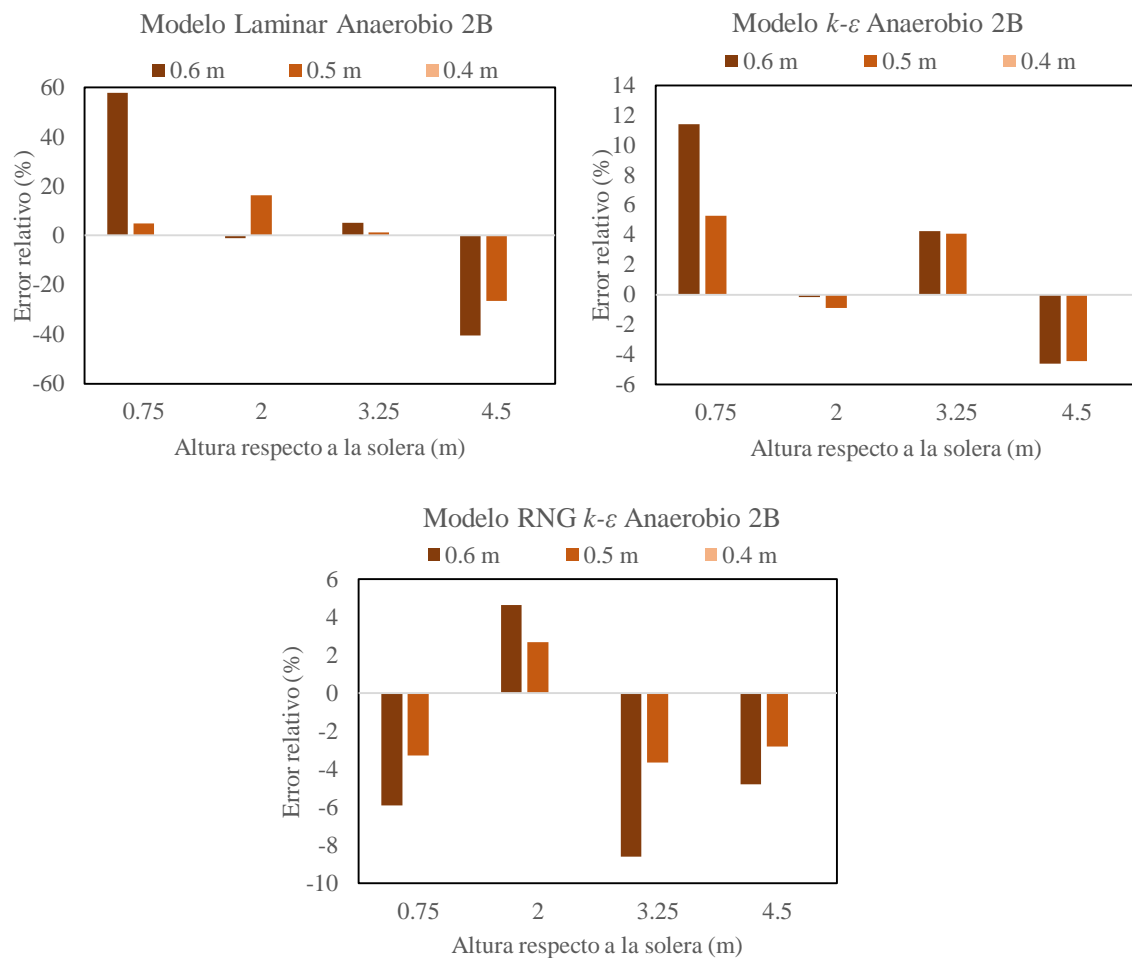


Figura 54. Error relativo de la velocidad entre los distintos tamaños de malla en las sondas Anaerobio 2B

En vista de los resultados, al tamaño de malla de 0.6 m le corresponde un mayor error, en la mayoría de los casos, en relación al tamaño de 0.5 m, cuyos resultados de velocidad se aproximan más a los obtenidos por la malla más fina.

Por otro lado, el modelo laminar se mantiene con porcentajes elevados de error llegando a sobreestimar el valor de la velocidad en un 60% en el primer nivel y para la malla más gruesa, mientras que en el último nivel analizado se subestima la velocidad alcanzándose un error de -40%. Con el modelo  $k-\varepsilon$  el error se reduce con respecto al anterior oscilando entre un 11 y un -4.6%. Asimismo, el modelo RNG  $k-\varepsilon$  tiende a subestimar la velocidad en la mayoría de los niveles analizados, siendo el error negativo máximo de -8.6%.

Como sucedía en la sonda anterior, en base al índice de convergencia de la malla, el uso de un modelo laminar no es apropiado dado que no consigue aproximarse al valor asintótico de la velocidad (Tabla 25).

| <b>Modelo Laminar</b> |                 |       |        |       |         |       |        |       |
|-----------------------|-----------------|-------|--------|-------|---------|-------|--------|-------|
| Tamaño de malla (m)   | Velocidad (m/s) |       |        |       | GCI (%) |       |        |       |
|                       | 0.75 m          | 2 m   | 3.25 m | 4.5 m | 0.75 m  | 2 m   | 3.25 m | 4.5 m |
| 0.6                   | 0.010           | 0.013 | 0.018  | 0.008 | -       | -     | -      | -     |
| 0.5                   | 0.007           | 0.015 | 0.017  | 0.010 | 143.47  | 42.75 | 11.00  | 54.30 |
| 0.4                   | 0.007           | 0.013 | 0.017  | 0.013 | 10.96   | 36.38 | 2.78   | 58.80 |

Tabla 25. Índice de convergencia de la malla para la velocidad en las sondas Anaerobio 2B según un modelo laminar

| <b>Modelo <math>k-\varepsilon</math></b> |                 |       |        |       |         |      |        |       |
|--|-----------------|-------|--------|-------|---------|------|--------|-------|
| Tamaño de malla (m)                      | Velocidad (m/s) |       |        |       | GCI (%) |      |        |       |
|  | 0.75 m          | 2 m   | 3.25 m | 4.5 m | 0.75 m  | 2 m  | 3.25 m | 4.5 m |
| 0.6                                      | 0.004           | 0.007 | 0.003  | 0.015 | -       | -    | -      | -     |
| 0.5                                      | 0.004           | 0.007 | 0.003  | 0.015 | 16.57   | 2.10 | 0.40   | 0.47  |
| 0.4                                      | 0.004           | 0.007 | 0.003  | 0.016 | 11.68   | 1.94 | 9.10   | 9.90  |

Tabla 26. Índice de convergencia de la malla para la velocidad en las sondas Anaerobio 2B según un modelo  $k-\varepsilon$

| Modelo RNG $k-\varepsilon$ |                 |       |        |       |         |      |        |       |
|----------------------------|-----------------|-------|--------|-------|---------|------|--------|-------|
| Tamaño de malla (m)        | Velocidad (m/s) |       |        |       | GCI (%) |      |        |       |
|                            | 0.75 m          | 2 m   | 3.25 m | 4.5 m | 0.75 m  | 2 m  | 3.25 m | 4.5 m |
| 0.6                        | 0.004           | 0.005 | 0.003  | 0.009 | -       | -    | -      | -     |
| 0.5                        | 0.005           | 0.005 | 0.004  | 0.010 | 7.73    | 5.40 | 14.63  | 5.89  |
| 0.4                        | 0.005           | 0.005 | 0.004  | 0.010 | 7.26    | 5.99 | 8.12   | 6.20  |

Tabla 27. Índice de convergencia de la malla para la velocidad en las sondas Anaerobio 2B según un modelo RNG  $k-\varepsilon$

Finalmente se exponen los resultados de velocidad para las sondas Anaerobio 2C, los cuales se presentan en la Figura 55.

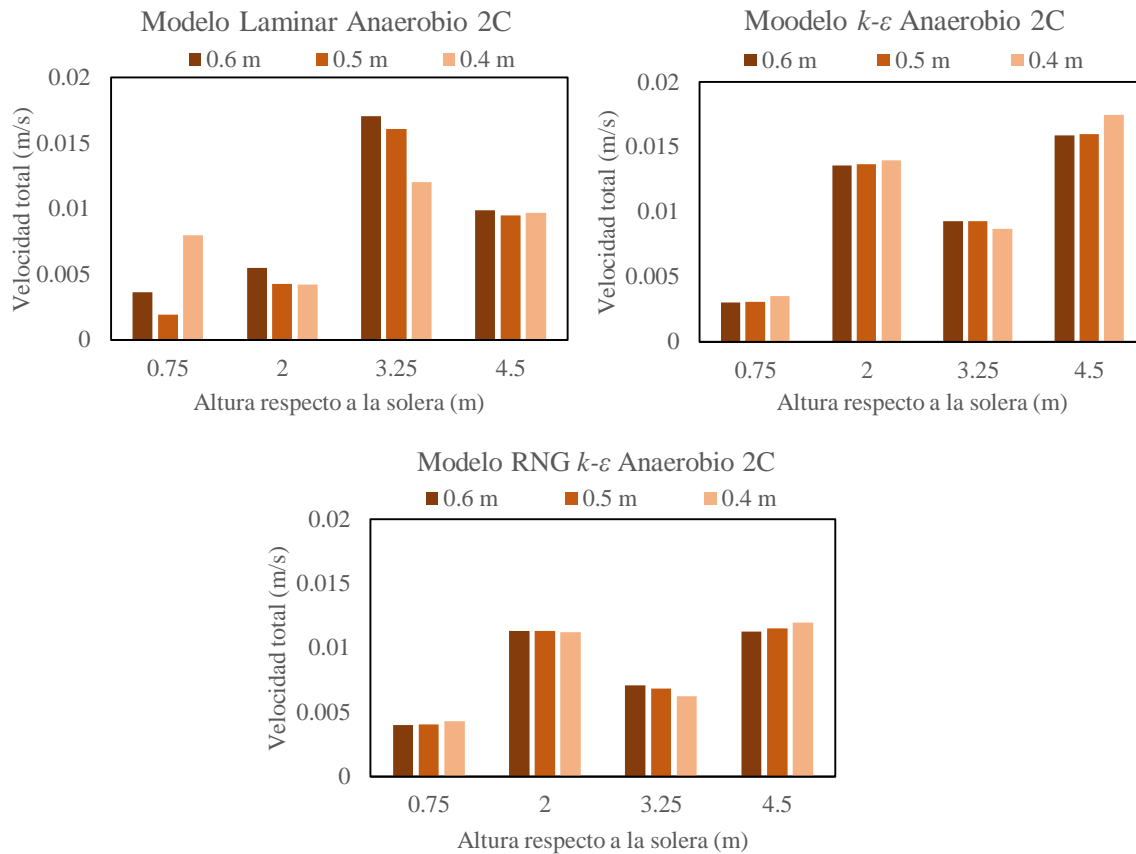


Figura 55. Velocidad total en las sondas Anaerobio 2C a distintas alturas según el modelo de turbulencia y el tamaño de malla

Comparando los modelos de turbulencia, el modelo  $k-\varepsilon$  y el modelo RNG  $k-\varepsilon$  obtienen los mayores valores de velocidad en los niveles situados a 2 y a 4.5 m sobre la

solera, mientras que el modelo laminar considera que es a 3.25 m sobre la solera donde se desarrolla mayor velocidad.

En relación al tamaño de malla, en el primer nivel es el tamaño de malla más fino el que registra mayor velocidad. A 2 m sobre la solera, para el modelo laminar y el modelo RNG  $k-\varepsilon$  la velocidad es directamente proporcional al tamaño de malla, en contra de lo que ocurre con el modelo  $k-\varepsilon$  donde la reducción del tamaño de malla aumenta la velocidad. En el siguiente nivel (3.25 m sobre la solera), la influencia del tamaño de malla coincide para todos los modelos de turbulencia, de modo que el refinamiento de la malla deriva en una reducción de la velocidad. En cambio, en el último nivel, son los modelos  $k-\varepsilon$  y RNG  $k-\varepsilon$  los que presentan velocidades inversamente proporcionales al tamaño de malla, efecto opuesto al observado con el modelo laminar.

La influencia de la altura sobre la solera en la velocidad es similar cuando se trabaja con modelos de turbulencia  $k-\varepsilon$  y RNG  $k-\varepsilon$ , como ocurría en las sondas Anaerobio 2B.

Seguidamente, la Figura 56 introduce los errores de velocidad generados según el tamaño de malla empleado en las sondas Anaerobio 2C.

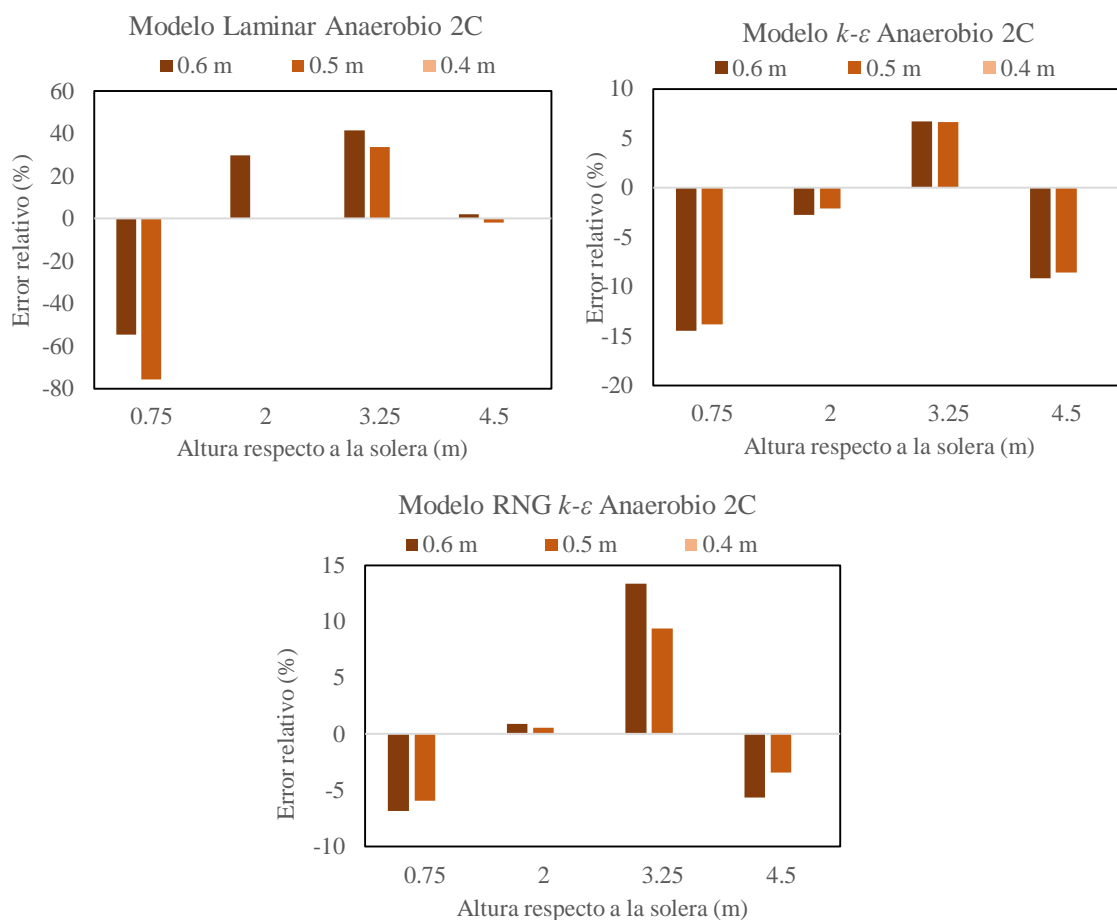


Figura 56. Error relativo de la velocidad entre los distintos tamaños de malla en las sondas Anaerobio 2C



Una vez más, se verifica la influencia del tamaño de malla en el modelo laminar y, que generalmente, un tamaño de malla grueso incrementa el error.

En el modelo laminar los tamaños de malla más gruesos obtienen valores de velocidad con errores que oscilan entre 40 y -75% respecto al calculado con la malla más fina, siendo el error en el último nivel el de menor magnitud. En el modelo  $k-\varepsilon$  estos errores se sitúan entre 7 y -14%, mientras el modelo RNG  $k-\varepsilon$  tiene errores de entre 13 y -7%, presentando ambos el menor error a 2 m sobre la solera.

El modelo laminar tiende a sobreestimar el valor de la velocidad con las mallas más gruesas, excepto en el primer nivel. Por el contrario, el modelo  $k-\varepsilon$  subestima el valor de la velocidad experimentada por el flujo, salvo a 3.25 m sobre la solera. El modelo RNG  $k-\varepsilon$  subestima la velocidad en el primer y último nivel, a la vez que sobreestima la velocidad en la zona central de la cámara.

En este caso, el índice de convergencia de la malla para el modelo  $k-\varepsilon$  y RNG  $k-\varepsilon$  tiende a aumentar al refinar la malla en todos los niveles, por lo que no se logra la convergencia de los resultados. El modelo laminar a pesar de que en dos de los niveles consigue disminuir el GCI, en las alturas restantes el valor del indicador es muy elevado, lo que indica que tampoco proporciona un valor de velocidad próximo al asintótico (Tablas 28, 29, 30).

| Modelo Laminar      |                 |       |        |       |         |       |        |       |
|---------------------|-----------------|-------|--------|-------|---------|-------|--------|-------|
| Tamaño de malla (m) | Velocidad (m/s) |       |        |       | GCI (%) |       |        |       |
|                     | 0.75 m          | 2 m   | 3.25 m | 4.5 m | 0.75 m  | 2 m   | 3.25 m | 4.5 m |
| 0.6                 | 0.004           | 0.005 | 0.017  | 0.010 | -       | -     | -      | -     |
| 0.5                 | 0.002           | 0.004 | 0.016  | 0.009 | 246.54  | 83.45 | 16.94  | 11.62 |
| 0.4                 | 0.008           | 0.004 | 0.012  | 0.010 | 168.23  | 0.87  | 74.68  | 4.04  |

Tabla 28. Índice de convergencia de la malla para la velocidad en las sondas Anaerobio 2C según un modelo laminar

| Modelo $k-\varepsilon$ |                 |       |        |       |         |      |        |       |
|------------------------|-----------------|-------|--------|-------|---------|------|--------|-------|
| Tamaño de malla (m)    | Velocidad (m/s) |       |        |       | GCI (%) |      |        |       |
|                        | 0.75 m          | 2 m   | 3.25 m | 4.5 m | 0.75 m  | 2 m  | 3.25 m | 4.5 m |
| 0.6                    | 0.003           | 0.014 | 0.009  | 0.016 | -       | -    | -      | -     |
| 0.5                    | 0.003           | 0.014 | 0.009  | 0.016 | 2.23    | 1.94 | 0.16   | 1.90  |
| 0.4                    | 0.004           | 0.014 | 0.009  | 0.017 | 30.64   | 4.64 | 14.85  | 19.00 |

Tabla 29. Índice de convergencia de la malla para la velocidad en las sondas Anaerobio 2C según un modelo  $k-\varepsilon$

| Modelo RNG $k-\varepsilon$ |                 |       |        |       |         |      |        |       |
|----------------------------|-----------------|-------|--------|-------|---------|------|--------|-------|
| Tamaño de malla (m)        | Velocidad (m/s) |       |        |       | GCI (%) |      |        |       |
|                            | 0.75 m          | 2 m   | 3.25 m | 4.5 m | 0.75 m  | 2 m  | 3.25 m | 4.5 m |
| 0.6                        | 0.004           | 0.011 | 0.007  | 0.011 | -       | -    | -      | -     |
| 0.5                        | 0.004           | 0.011 | 0.007  | 0.012 | 2.82    | 0.84 | 10.45  | 6.63  |
| 0.4                        | 0.004           | 0.011 | 0.006  | 0.012 | 13.13   | 1.31 | 20.80  | 7.55  |

Tabla 30. Índice de convergencia de la malla para la velocidad en las sondas Anaerobio 2C según un modelo RNG  $k-\varepsilon$

Para favorecer la comprensión de los resultados expuestos y a modo de síntesis, en las figuras siguientes se muestran distribuciones de la velocidad en planos horizontales y verticales según el modelo de turbulencia empleado y para el tamaño de malla más fino (0.4 m). La distribución de la velocidad es similar al trabajar con el modelo de turbulencia  $k-\varepsilon$  y el RNG  $k-\varepsilon$ , hecho observado tanto en planos horizontales como en cortes longitudinales de la cámara.

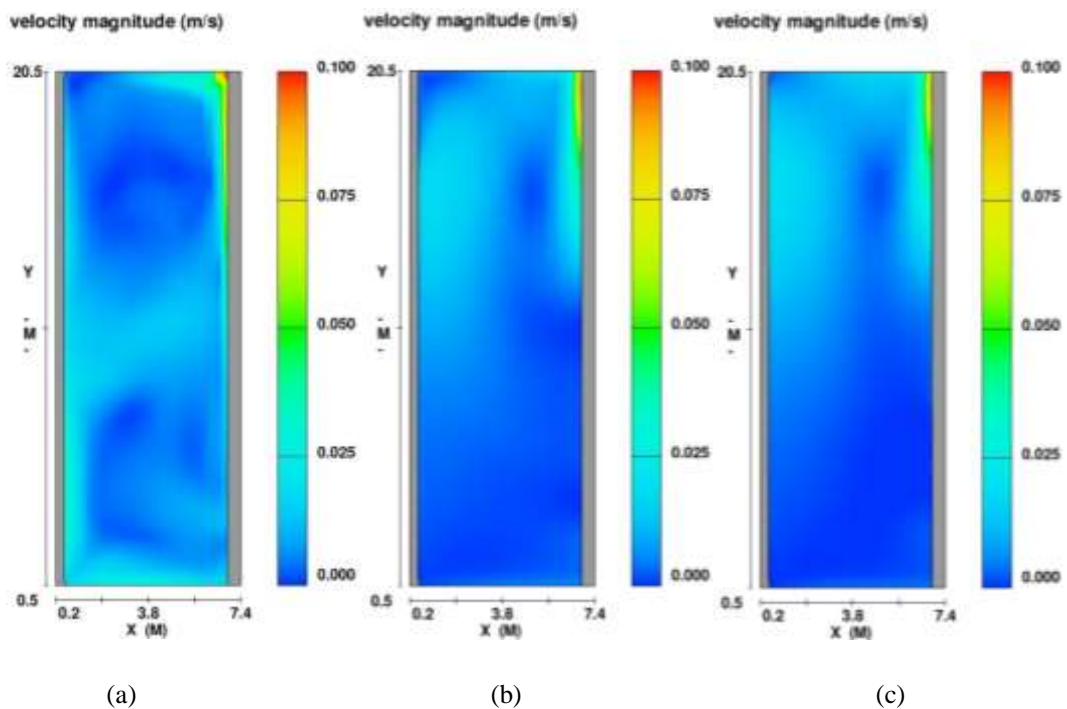


Figura 57. Velocidad en un plano horizontal intermedio entre las salidas y la entrada (1.5 m sobre la solera) para un tamaño de malla de 0.4 m: (a) modelo laminar, (b) modelo  $k-\varepsilon$  y (c) modelo RNG  $k-\varepsilon$

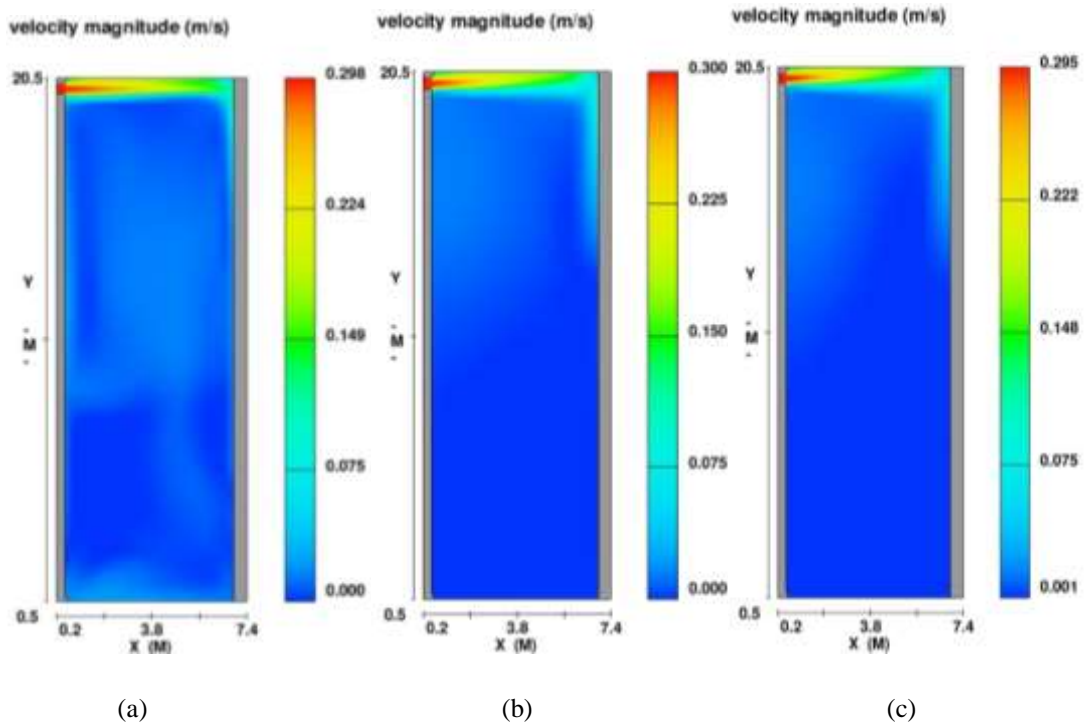


Figura 58. Velocidad en un plano horizontal a nivel de la entrada (2.8 m sobre la solera) para un tamaño de malla de 0.4 m: (a) modelo laminar, (b) modelo  $k-\varepsilon$  y (c) modelo RNG  $k-\varepsilon$

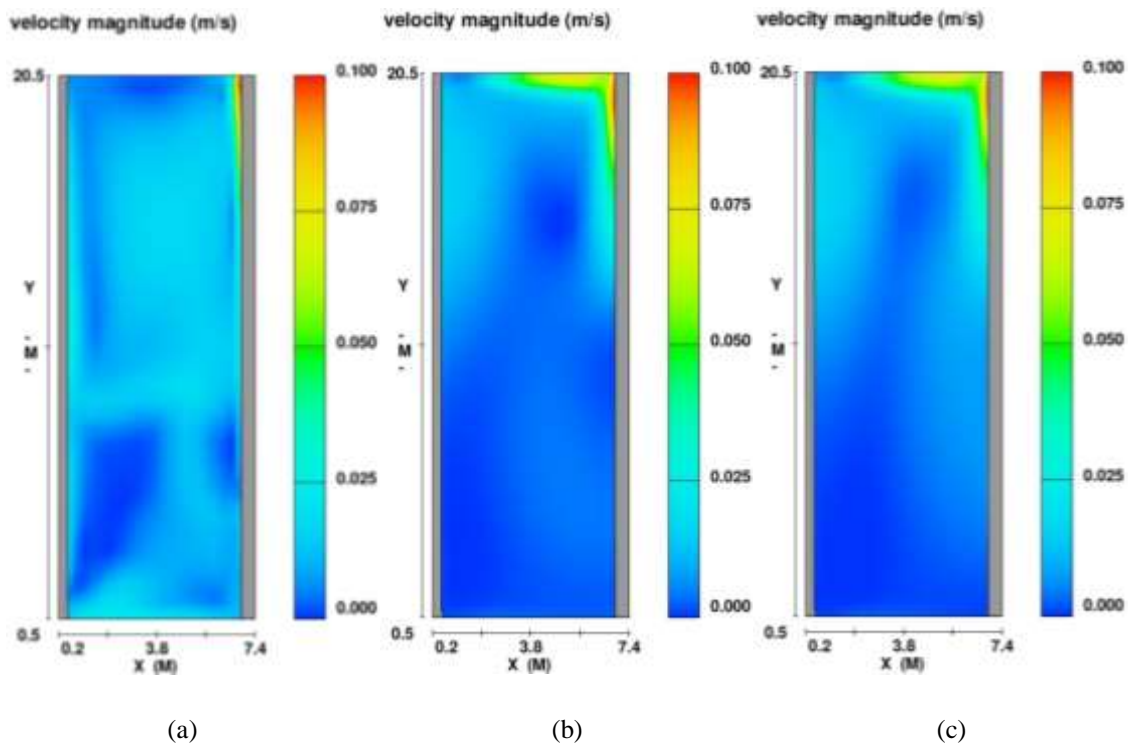
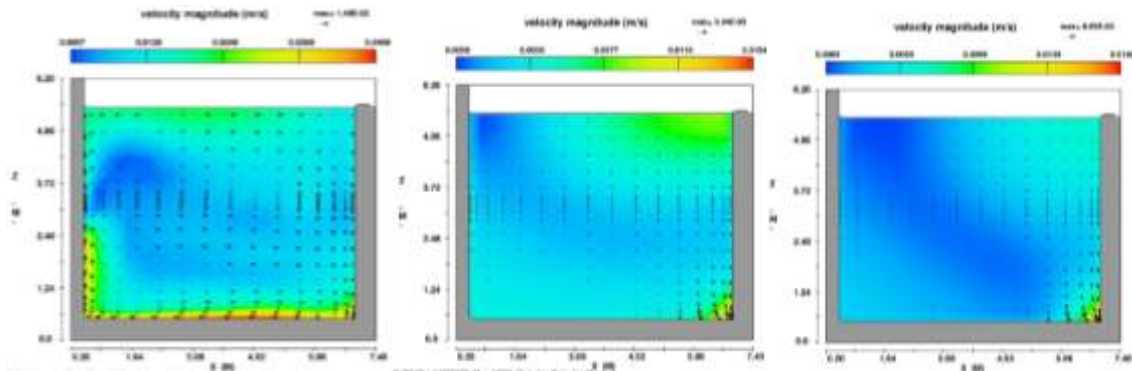


Figura 59. Velocidad en un plano horizontal entre la entrada y la superficie libre (3.5 m sobre la solera) para un tamaño de malla de 0.4 m: (a) modelo laminar, (b) modelo  $k-\varepsilon$  y (c) modelo RNG  $k-\varepsilon$

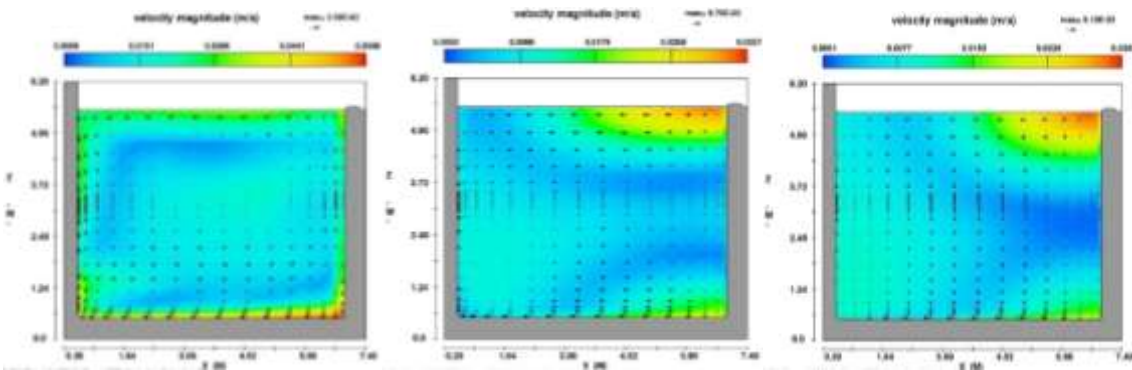


(a)

(b)

(c)

Figura 60. Velocidad en un plano longitudinal a 2.5 m de la pared exterior para un tamaño de malla de 0.4 m: (a) modelo laminar, (b) modelo  $k-\epsilon$  y (c) modelo RNG  $k-\epsilon$

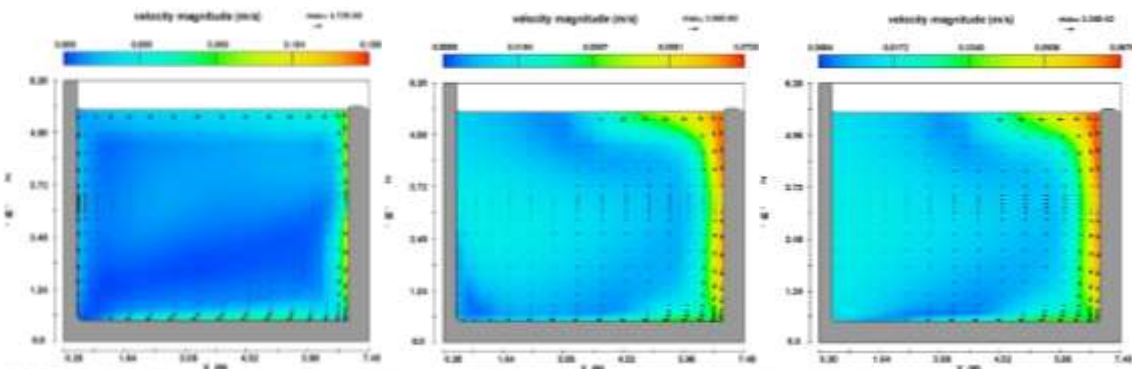


(a)

(b)

(c)

Figura 61. Velocidad en un plano longitudinal a mitad de la cámara para un tamaño de malla de 0.4 m: (a) modelo laminar, (b) modelo  $k-\epsilon$  y (c) modelo RNG  $k-\epsilon$



(a)

(b)

(c)

Figura 62. Velocidad en un plano longitudinal a 2.5 m de la pared interior para un tamaño de malla de 0.4 m: (a) modelo laminar, (b) modelo  $k-\epsilon$  y (c) modelo RNG  $k-\epsilon$

### 7.2.3. Distancia recorrida por el fluido

Otra de las variables analizadas es la distancia recorrida por el fluido. Igual que en las secciones anteriores, se investiga la influencia del modelo de turbulencia y el tamaño de malla, así como su variación en altura teniendo en cuenta los resultados obtenidos en las sondas descritas con anterioridad. La Figura 63 muestra dicha información para las sondas Anaerobio 2A.

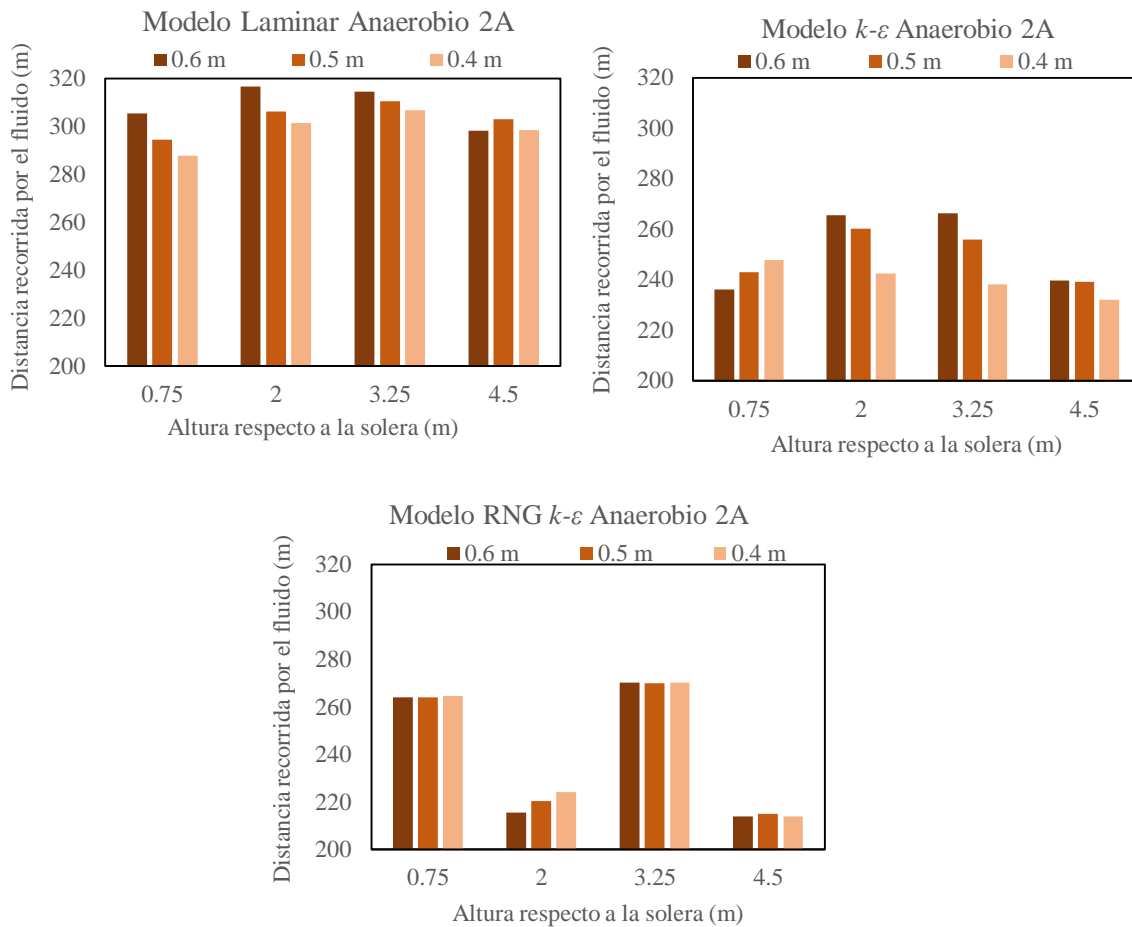


Figura 63. Distancia recorrida por el fluido medida en las sondas Anaerobio 2A a distintas alturas según el modelo de turbulencia y el tamaño de malla

En el modelo laminar la distancia recorrida por el fluido es superior a la experimentada con el resto de modelos. Los valores mínimos se consiguen a 0.75 m y a 3.25 m con el modelo  $k-\varepsilon$  y a 2 m y a 4.5 m con el modelo RNG  $k-\varepsilon$ .

Respecto al tamaño de malla, con el modelo laminar y el modelo  $k-\varepsilon$  se aprecia como la distancia recorrida disminuye al refinar la malla, excepto en el último nivel con un modelo laminar donde es el tamaño de 0.5 m el que obtiene una mayor distancia

recorrida por el fluido y, en el primer nivel con el modelo  $k-\varepsilon$  ya que la distancia recorrida sería ahora inversamente proporcional al tamaño de la malla. El modelo RNG  $k-\varepsilon$  a 0.75 m y a 3.25 m sobre la solera registra mayor distancia recorrida con el tamaño de malla más fino. A 2 m de la solera un refinamiento de la malla se traduce en un aumento de la distancia recorrida. En el último nivel el tamaño de malla de 0.4 m obtiene una distancia intermedia entre la de los tamaños de malla más gruesos.

Si atendemos al efecto de la altura, los modelos laminar y  $k-\varepsilon$  comparten que en los niveles centrales la distancia recorrida es mayor.

A fin de analizar el error relativo de la distancia recorrida por el fluido calculada con los tamaños de malla más gruesos respecto a la obtenida con el tamaño de malla más fina (valor considerado como el más cercano al real) se incluyen las gráficas siguientes (Figura 64).

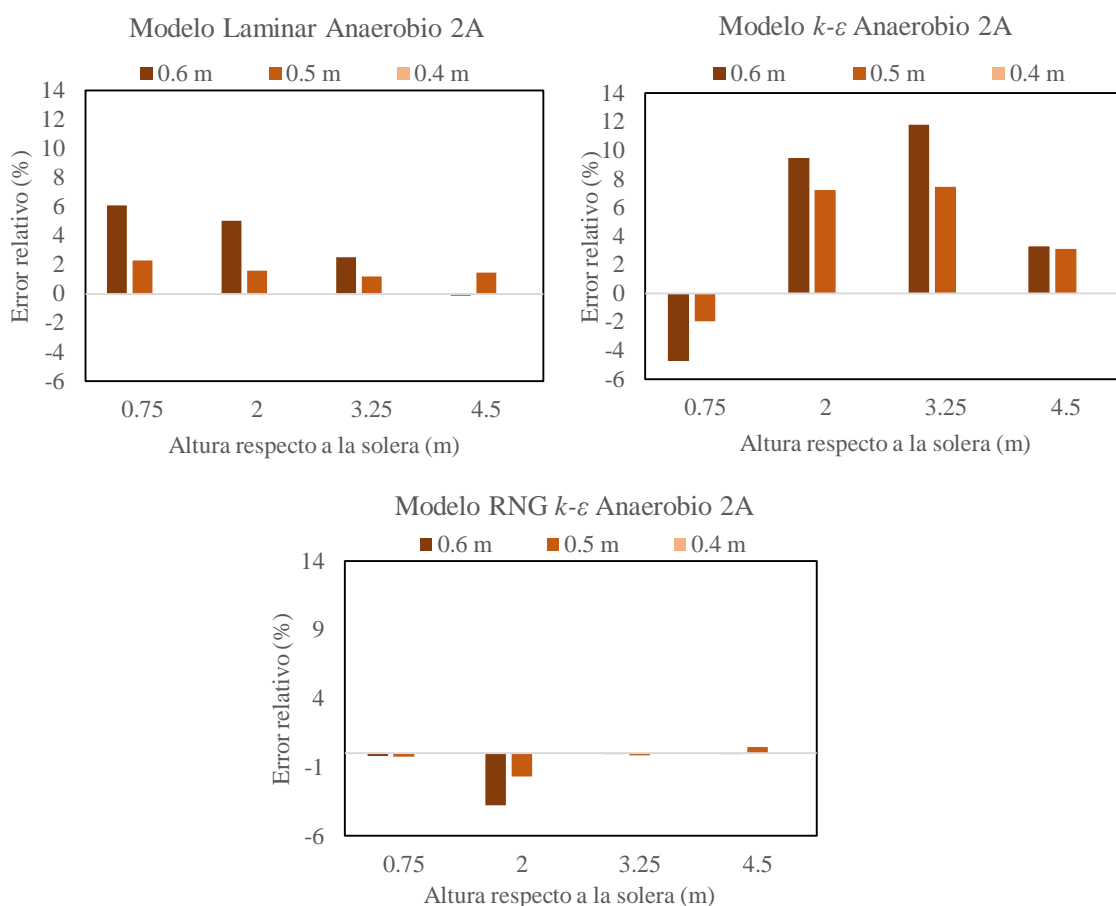


Figura 64. Error relativo de la distancia recorrida por el fluido entre los distintos tamaños de malla en las sondas Anaerobio 2A

El modelo que presenta mayor error es, en este caso, el modelo  $k-\varepsilon$ , entre tanto el modelo RNG  $k-\varepsilon$  continúa reflejando porcentajes de error reducidos al emplear las mallas más gruesas.

El modelo laminar y el  $k-\varepsilon$  tienden a sobreestimar el valor de la distancia recorrida por el fluido en el caso de emplear tamaños de malla gruesos. Por el contrario, el modelo RNG  $k-\varepsilon$  subestima dicho valor.

En base al índice de convergencia de la malla, al disminuir el tamaño de la misma el modelo laminar se aproxima al valor asintótico en todos los niveles. El modelo RNG  $k-\varepsilon$ , a pesar de que en el primer nivel aumenta ligeramente el indicador al refinar la malla, por lo general, es el modelo que mejor logra la convergencia de los resultados correspondiéndole el menor valor de GCI. Sin embargo, el modelo  $k-\varepsilon$  presenta un comportamiento opuesto no encontrándose la solución dentro del rango asintótico.

| Modelo Laminar      |               |        |        |        |         |      |        |       |
|---------------------|---------------|--------|--------|--------|---------|------|--------|-------|
| Tamaño de malla (m) | Distancia (m) |        |        |        | GCI (%) |      |        |       |
|                     | 0.75 m        | 2 m    | 3.25 m | 4.5 m  | 0.75 m  | 2 m  | 3.25 m | 4.5 m |
| 0.6                 | 305.41        | 316.54 | 314.56 | 298.12 | -       | -    | -      | -     |
| 0.5                 | 294.54        | 306.20 | 310.43 | 302.88 | 10.48   | 9.59 | 3.78   | 4.47  |
| 0.4                 | 287.87        | 301.44 | 306.81 | 298.47 | 5.15    | 3.51 | 2.63   | 3.29  |

Tabla 31. Índice de convergencia de la malla para la distancia recorrida por el fluido en las sondas Anaerobio 2A según un modelo laminar

| Modelo $k-\varepsilon$ |               |        |        |        |         |       |        |       |
|------------------------|---------------|--------|--------|--------|---------|-------|--------|-------|
| Tamaño de malla (m)    | Distancia (m) |        |        |        | GCI (%) |       |        |       |
|                        | 0.75 m        | 2 m    | 3.25 m | 4.5 m  | 0.75 m  | 2 m   | 3.25 m | 4.5 m |
| 0.6                    | 236.13        | 265.66 | 266.34 | 239.70 | -       | -     | -      | -     |
| 0.5                    | 243.03        | 260.18 | 255.98 | 239.22 | 8.06    | 5.98  | 11.50  | 0.58  |
| 0.4                    | 247.83        | 242.64 | 238.20 | 232.04 | 4.30    | 16.06 | 16.59  | 6.87  |

Tabla 32. Índice de convergencia de la malla para la distancia recorrida por el fluido en las sondas Anaerobio 2A según un modelo  $k-\varepsilon$

| Modelo RNG $k-\varepsilon$ |               |        |        |        |         |      |        |       |
|----------------------------|---------------|--------|--------|--------|---------|------|--------|-------|
| Tamaño de malla (m)        | Distancia (m) |        |        |        | GCI (%) |      |        |       |
|                            | 0.75 m        | 2 m    | 3.25 m | 4.5 m  | 0.75 m  | 2 m  | 3.25 m | 4.5 m |
| 0.6                        | 264.17        | 215.68 | 270.30 | 213.99 | -       | -    | -      | -     |
| 0.5                        | 263.95        | 220.36 | 269.99 | 215.09 | 0.24    | 6.03 | 0.32   | 1.45  |
| 0.4                        | 264.62        | 224.11 | 270.34 | 214.07 | 0.56    | 3.72 | 0.28   | 1.06  |

Tabla 33. Índice de convergencia de la malla para la distancia recorrida por el fluido en las sondas Anaerobio 2A según un modelo RNG  $k-\varepsilon$

Para las sondas Anaerobio 2B, la distancia recorrida por el fluido queda recogida en las gráficas siguientes (Figura 65).

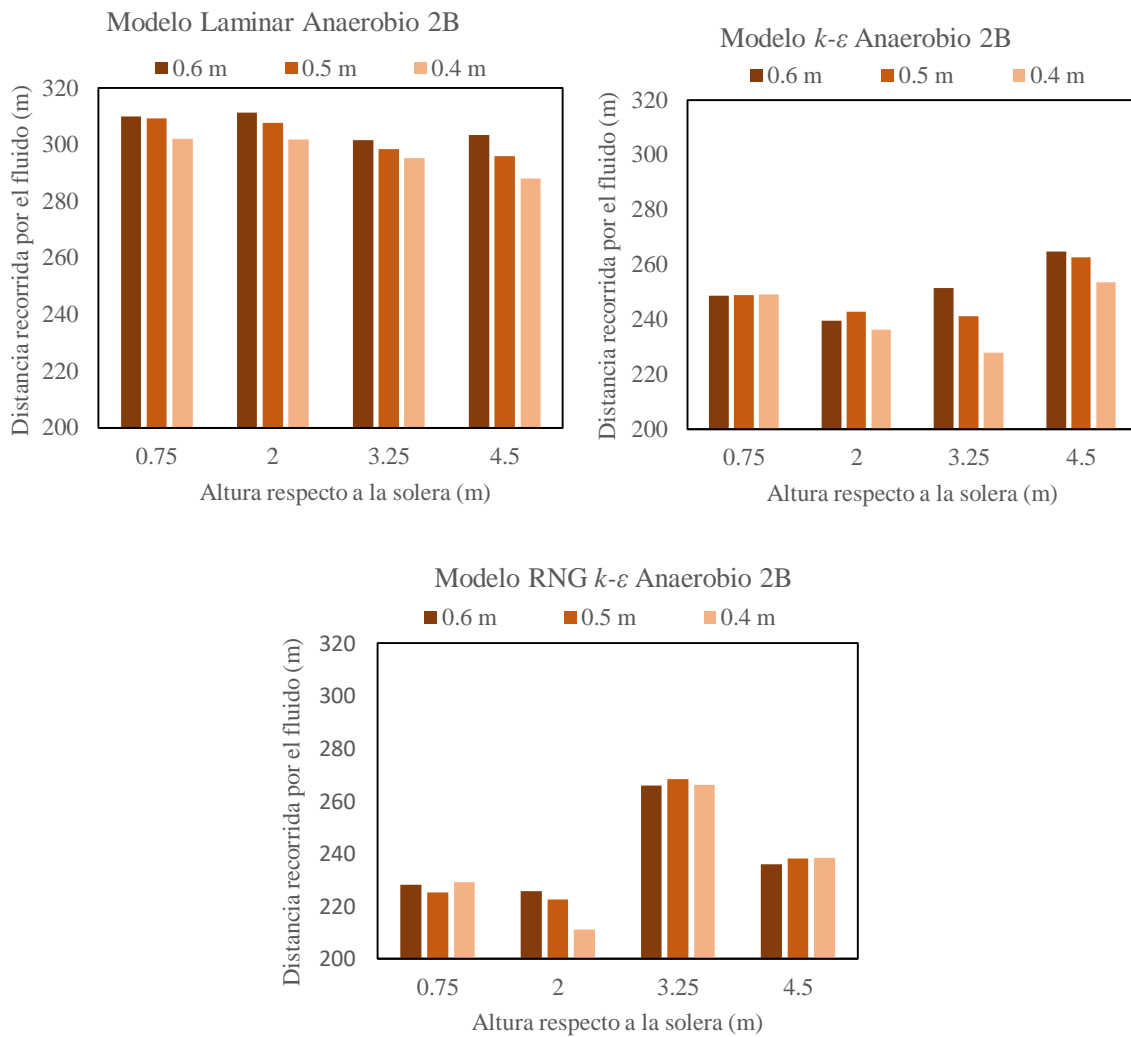


Figura 65. Distancia recorrida por el fluido medida en las sondas Anaerobio 2B a distintas alturas según el modelo de turbulencia y el tamaño de malla

En el modelo laminar la distancia recorrida por el fluido es superior a la experimentada con el resto de modelos, como ocurría en las sondas anteriores. El modelo RNG  $k-\varepsilon$  presenta menor distancia en todos los niveles salvo a 3.25 m, nivel en el cual la menor velocidad la registra el modelo  $k-\varepsilon$ .

Para un modelo laminar, se puede comprobar que, a medida que se reduce el tamaño de malla se logran distancias recorridas por el fluido inferiores. Esto mismo ocurriría para un modelo  $k-\varepsilon$  en los dos niveles superiores de la cámara. En el resto de niveles para este último modelo de turbulencia tendríamos: aumento de la distancia al refinar la malla para el primer nivel y, a 2 m sobre la solera, la mayor distancia recorrida por el fluido se obtiene con un tamaño de malla de 0.5 m. Trabajando con el modelo



RNG  $k-\varepsilon$ , en el punto situado a 2 m de la solera la distancia recorrida disminuye a la vez que lo hace el tamaño de malla, sin embargo, en el último nivel se produce lo contrario.

Las siguientes gráficas permiten conocer el error relativo del valor de la distancia recorrida por el fluido obtenido por los tamaños de malla más gruesos respecto a correspondiente a la malla más fina (Figura 66).

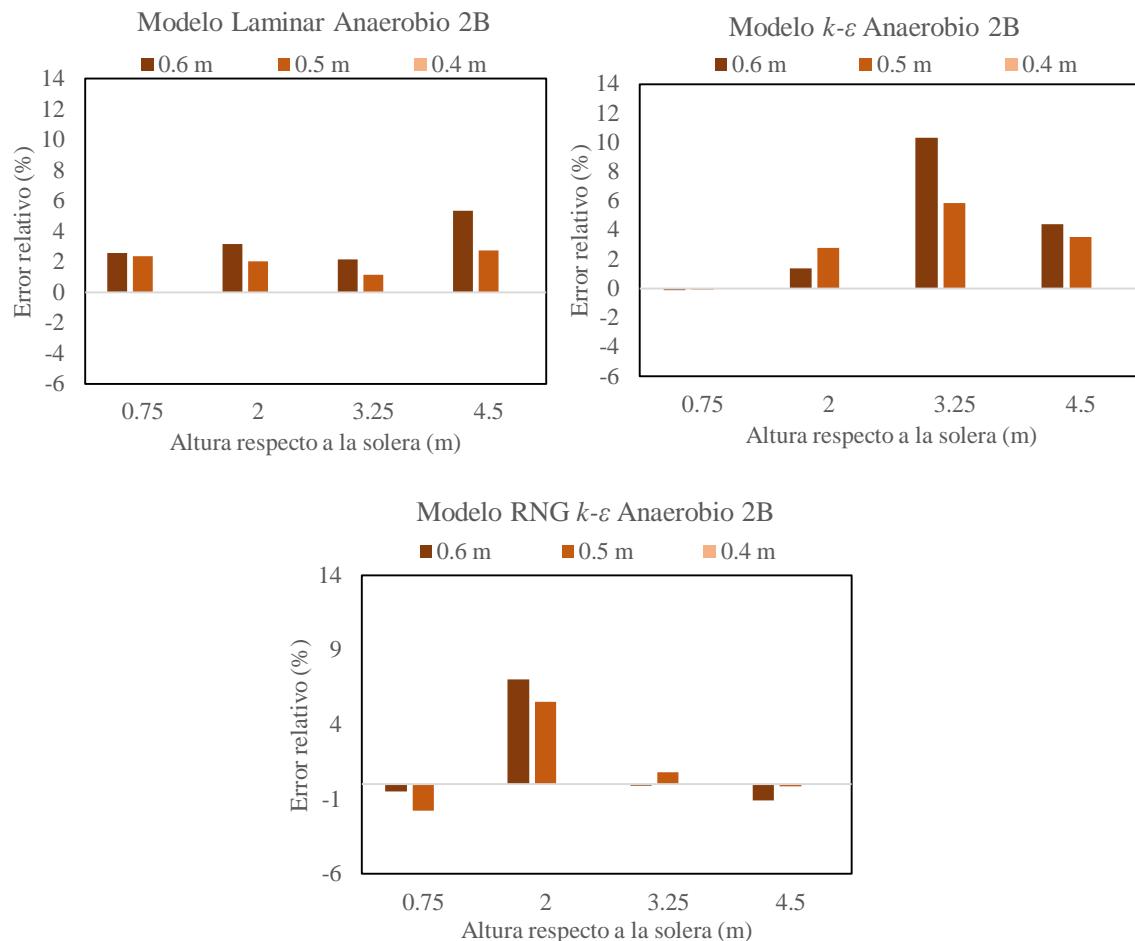


Figura 66. Error relativo de la distancia recorrida por el fluido entre los distintos tamaños de malla en las sondas Anaerobio 2B

Como se desprende de las mismas, el modelo laminar y el modelo  $k-\varepsilon$  tienden a sobreestimar la distancia recorrida. Los errores de las mallas más gruesas, derivados del empleo de un modelo laminar, son similares en los cuatro niveles analizados y oscilan entre 1 y 5%. En el modelo  $k-\varepsilon$  este error aumenta en los tres niveles superiores llegando a alcanzar un porcentaje de un 10%. En cambio, con el modelo RNG  $k-\varepsilon$  el error se reduce situándose incluso por debajo del 1%, salvo en el nivel situado a 2 m sobre la solera.

En la mayoría de ocasiones, es al tamaño de malla de 0.6 m al que le corresponde mayor error, aunque hay excepciones para el modelo  $k-\varepsilon$  y el RNG  $k-\varepsilon$ . En estos

últimos, el tamaño de malla de 0.5 m conlleva errores superiores a la malla más gruesa en los niveles situados a 2 m sobre la solera para el modelo  $k-\varepsilon$  y a 0.75 y 3.25 m para el modelo RNG  $k-\varepsilon$ .

Los resultados obtenidos con el modelo laminar y el modelo  $k-\varepsilon$  no se encuentran dentro del rango asintótico de convergencia pues al disminuir el tamaño de malla aumenta el GCI. No obstante, el indicador se encuentra entorno al 5% para el modelo laminar, adquiriendo valores superiores con el modelo  $k-\varepsilon$  (excepto a 0.75 m de la solera). El modelo RNG  $k-\varepsilon$  converge adecuadamente en los dos últimos niveles (Tablas 34, 35, 36).

| Modelo Laminar      |               |        |        |        |         |      |        |       |
|---------------------|---------------|--------|--------|--------|---------|------|--------|-------|
| Tamaño de malla (m) | Distancia (m) |        |        |        | GCI (%) |      |        |       |
|                     | 0.75 m        | 2 m    | 3.25 m | 4.5 m  | 0.75 m  | 2 m  | 3.25 m | 4.5 m |
| 0.6                 | 309.92        | 311.33 | 301.57 | 303.47 | -       | -    | -      | -     |
| 0.5                 | 309.25        | 307.85 | 298.58 | 295.98 | 0.61    | 3.21 | 2.85   | 7.20  |
| 0.4                 | 302.10        | 301.77 | 295.22 | 288.07 | 5.26    | 4.47 | 2.53   | 6.10  |

Tabla 34. Índice de convergencia de la malla para la distancia recorrida por el fluido en las sondas Anaerobio 2B según un modelo laminar

| Modelo $k-\varepsilon$ |               |        |        |        |         |      |        |       |
|------------------------|---------------|--------|--------|--------|---------|------|--------|-------|
| Tamaño de malla (m)    | Distancia (m) |        |        |        | GCI (%) |      |        |       |
|                        | 0.75 m        | 2 m    | 3.25 m | 4.5 m  | 0.75 m  | 2 m  | 3.25 m | 4.5 m |
| 0.6                    | 248.77        | 239.61 | 251.52 | 264.83 | -       | -    | -      | -     |
| 0.5                    | 248.88        | 242.89 | 241.28 | 262.61 | 0.13    | 3.83 | 12.06  | 2.40  |
| 0.4                    | 249.05        | 236.32 | 227.97 | 253.62 | 0.16    | 6.17 | 12.98  | 7.88  |

Tabla 35. Índice de convergencia de la malla para la distancia recorrida por el fluido en las sondas Anaerobio 2B según un modelo  $k-\varepsilon$

| Modelo RNG $k-\varepsilon$ |               |        |        |        |         |       |        |       |
|----------------------------|---------------|--------|--------|--------|---------|-------|--------|-------|
| Tamaño de malla (m)        | Distancia (m) |        |        |        | GCI (%) |       |        |       |
|                            | 0.75 m        | 2 m    | 3.25 m | 4.5 m  | 0.75 m  | 2 m   | 3.25 m | 4.5 m |
| 0.6                        | 228.07        | 225.83 | 266.03 | 235.86 | -       | -     | -      | -     |
| 0.5                        | 225.17        | 222.63 | 268.37 | 238.15 | 3.65    | 4.09  | 2.48   | 2.73  |
| 0.4                        | 229.23        | 211.01 | 266.26 | 238.45 | 3.93    | 12.23 | 1.76   | 0.28  |

Tabla 36. Índice de convergencia de la malla para la distancia recorrida por el fluido en las sondas Anaerobio 2B según un modelo RNG  $k-\varepsilon$

Del mismo modo, se concluye con el análisis de la distancia recorrida para las sondas anaerobio 2C. La siguiente figura representa la distancia recorrida según el modelo de turbulencia, el tamaño de malla y la altura sobre la solera (Figura 67).

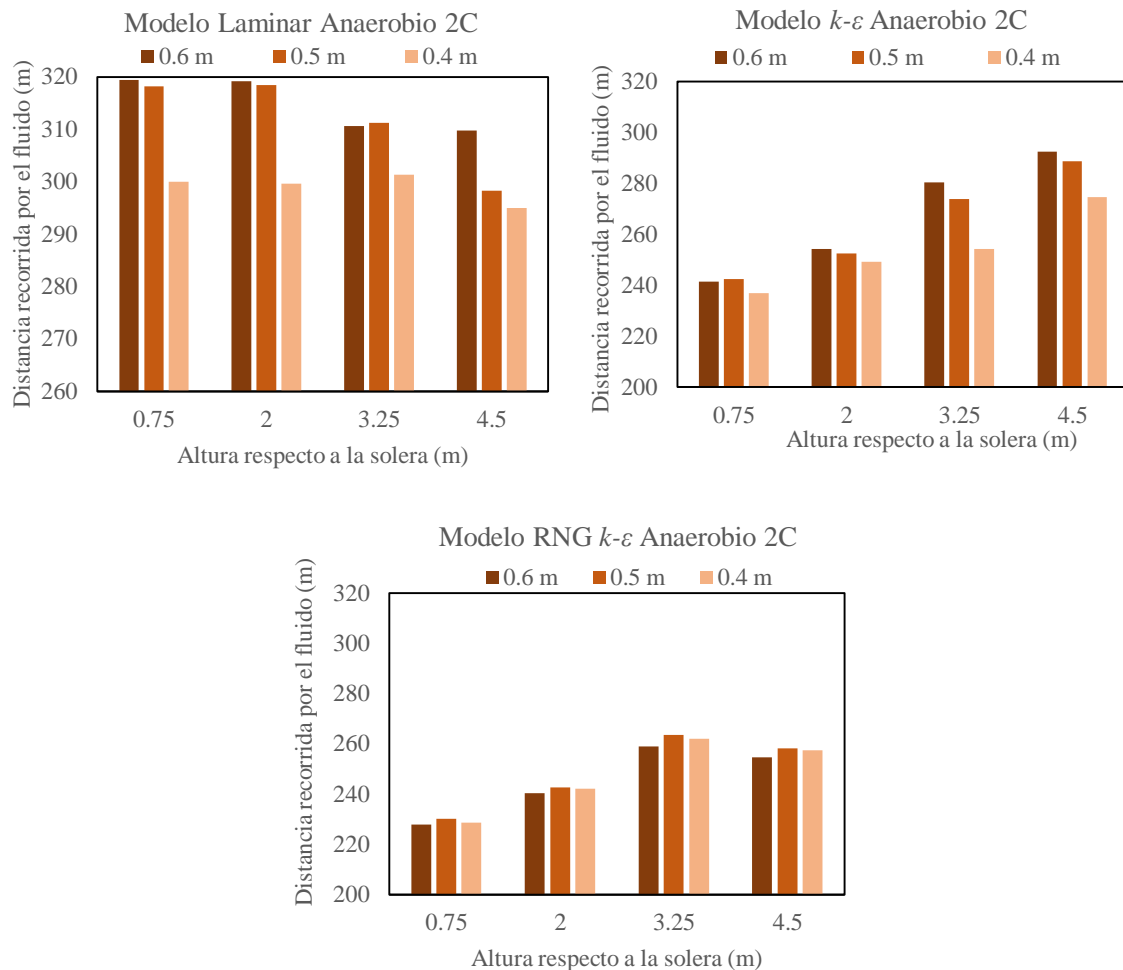


Figura 67. Distancia recorrida por el fluido medida en las sondas Anaerobio 2C a distintas alturas según el modelo de turbulencia y el tamaño de malla

En vista de los resultados, el modelo laminar presenta distancias recorridas por el fluido superiores al resto de modelos, siendo el modelo RNG  $k-\epsilon$  el que obtiene la menor distancia recorrida.

Según el tamaño de malla, en el modelo laminar y en el modelo  $k-\epsilon$  una reducción del tamaño del mismo implica distancias recorridas por el fluido inferiores. Por otro lado, con un modelo RNG  $k-\epsilon$  la mayor distancia recorrida por el fluido le corresponde al tamaño de malla de 0.5 m, tomando la malla más fina un valor intermedio entre el obtenido por las mallas más gruesas.

Siguiendo con la influencia de la altura sobre la solera del punto en cuestión, al aumentar la altura disminuye la distancia recorrida para el modelo laminar, en contra de lo que se viene observando para los modelos  $k-\varepsilon$  y RNG  $k-\varepsilon$ , ya que con ellos la distancia recorrida aumentaría.

Las gráficas siguientes se han generado de manera que se pueda visualizar el porcentaje de error, correspondiente a la distancia recorrida por el fluido obtenidas con los tamaños de malla más gruesos, en las sondas Anaerobio 2C (Figura 68).

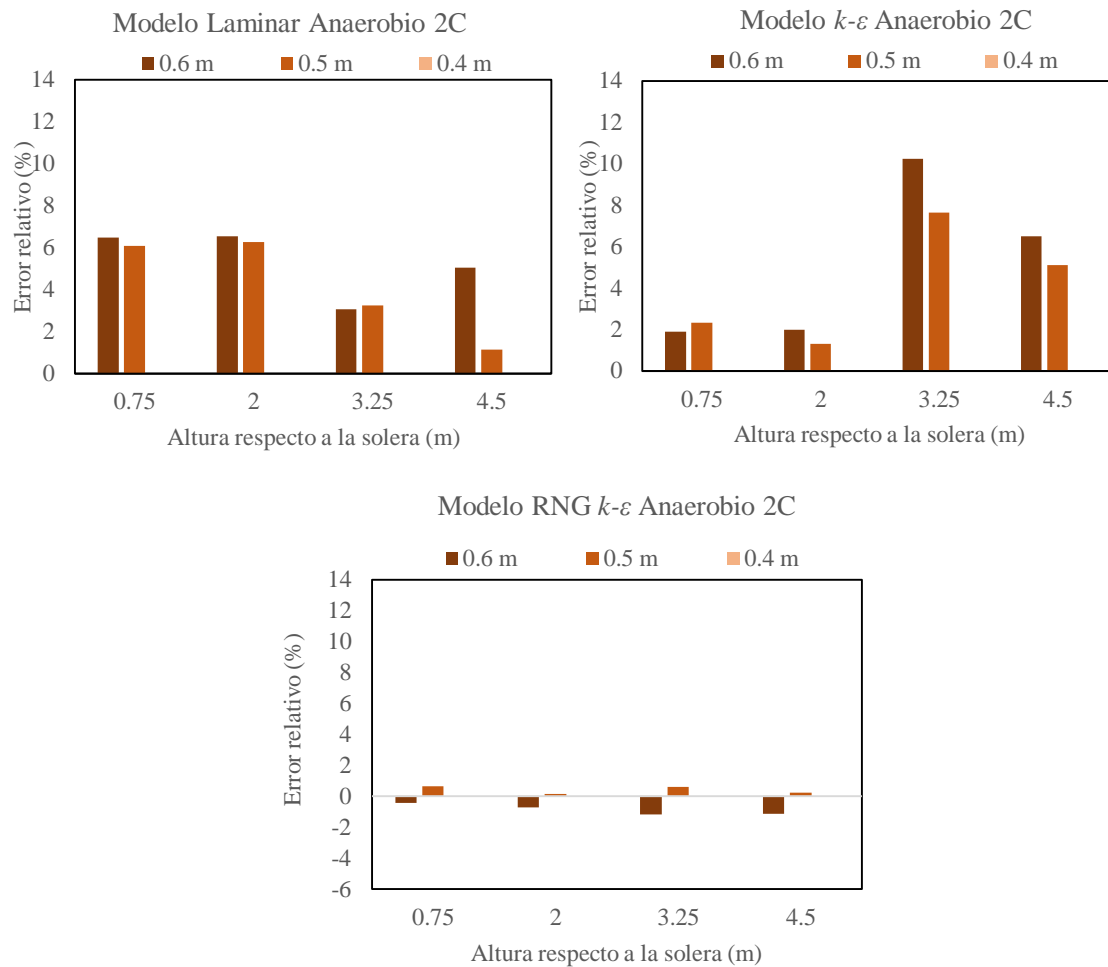


Figura 68. Error relativo de la distancia recorrida por el fluido entre los distintos tamaños de malla en las sondas Anaerobio 2C

Los tamaños de malla más gruesos suelen sobreestimar la distancia recorrida por el fluido cuando se emplea un modelo laminar o un modelo  $k-\varepsilon$ . En el caso de trabajar con un modelo RNG  $k-\varepsilon$  el tamaño de malla más grueso subestima la distancia recorrida, mientras que el tamaño de malla intermedio sobreestima dicho valor.

Asimismo, si comparamos los distintos modelos de turbulencia, los máximos errores según el nivel analizado se generan en los dos niveles inferiores cuando se emplea un modelo laminar y, en los dos restantes con el modelo  $k-\varepsilon$ . El porcentaje de error se encuentra entre un 6 y un 10%. Sin embargo, con un modelo RNG  $k-\varepsilon$  la influencia del tamaño de malla se reduce siendo el error de  $\pm 1\%$ .

Por lo que se refiere al índice de convergencia de la malla, el modelo laminar y el modelo  $k-\varepsilon$  provocan un incremento del GCI al reducir el tamaño de la malla, por lo que no se produce la convergencia de los resultados, siendo su empleo el menos recomendado. Por el contrario, con el modelo RNG  $k-\varepsilon$  el GCI disminuye en todos los niveles tomando valores entorno al 1% y logrando por tanto resultados próximos al valor asintótico al aumentar la resolución de la malla. Además, según la Figura 68, la influencia del tamaño de malla para el modelo RNG  $k-\varepsilon$  es reducida y los errores relativos pueden considerarse despreciables. A consecuencia de ello, el empleo del modelo RNG  $k-\varepsilon$  podría considerarse el más apropiado (Tablas 37, 38, 39).

| Modelo Laminar      |               |        |        |        |         |       |        |       |
|---------------------|---------------|--------|--------|--------|---------|-------|--------|-------|
| Tamaño de malla (m) | Distancia (m) |        |        |        | GCI (%) |       |        |       |
|                     | 0.75 m        | 2 m    | 3.25 m | 4.5 m  | 0.75 m  | 2 m   | 3.25 m | 4.5 m |
| 0.6                 | 319.41        | 319.24 | 310.62 | 309.82 | -       | -     | -      | -     |
| 0.5                 | 318.23        | 318.45 | 311.18 | 298.35 | 1.05    | 0.70  | 0.51   | 10.92 |
| 0.4                 | 299.99        | 299.65 | 301.39 | 294.96 | 13.52   | 13.94 | 7.22   | 2.55  |

Tabla 37. Índice de convergencia de la malla para la distancia recorrida por el fluido en las sondas Anaerobio 2C según un modelo laminar

| Modelo $k-\varepsilon$ |               |        |        |        |         |      |        |       |
|------------------------|---------------|--------|--------|--------|---------|------|--------|-------|
| Tamaño de malla (m)    | Distancia (m) |        |        |        | GCI (%) |      |        |       |
|                        | 0.75 m        | 2 m    | 3.25 m | 4.5 m  | 0.75 m  | 2 m  | 3.25 m | 4.5 m |
| 0.6                    | 241.53        | 254.29 | 280.47 | 292.55 | -       | -    | -      | -     |
| 0.5                    | 242.56        | 252.64 | 273.88 | 288.77 | 1.20    | 1.85 | 6.84   | 3.72  |
| 0.4                    | 237.05        | 249.37 | 254.41 | 274.71 | 5.16    | 2.91 | 17.01  | 11.37 |

Tabla 38. Índice de convergencia de la malla para la distancia recorrida por el fluido en las sondas Anaerobio 2C según un modelo  $k-\varepsilon$

| Modelo RNG $k-\epsilon$ |               |        |        |        |         |      |        |       |
|-------------------------|---------------|--------|--------|--------|---------|------|--------|-------|
| Tamaño de malla (m)     | Distancia (m) |        |        |        | GCI (%) |      |        |       |
|                         | 0.75 m        | 2 m    | 3.25 m | 4.5 m  | 0.75 m  | 2 m  | 3.25 m | 4.5 m |
| 0.6                     | 227.80        | 240.43 | 258.99 | 254.58 | -       | -    | -      | -     |
| 0.5                     | 230.21        | 242.57 | 263.58 | 258.08 | 2.97    | 2.51 | 4.95   | 3.86  |
| 0.4                     | 228.78        | 242.24 | 262.05 | 257.55 | 1.38    | 0.31 | 1.30   | 0.46  |

Tabla 39. Índice de convergencia de la malla para la distancia recorrida por el fluido en las sondas Anaerobio 2C según un modelo RNG  $k-\epsilon$

Para visualizar los resultados expuestos, en las figuras siguientes se muestran distribuciones de la distancia recorrida por el fluido en planos horizontales a distintos niveles según el modelo de turbulencia empleado y para el tamaño de malla más fino. Se comprueba que la distribución de la distancia recorrida en dichos planos es similar cuando se emplea un modelo de turbulencia  $k-\epsilon$  y RNG  $k-\epsilon$ . Lo mismo ocurre cuando se compara la distribución de la distancia recorrida en cortes longitudinales de la cámara.

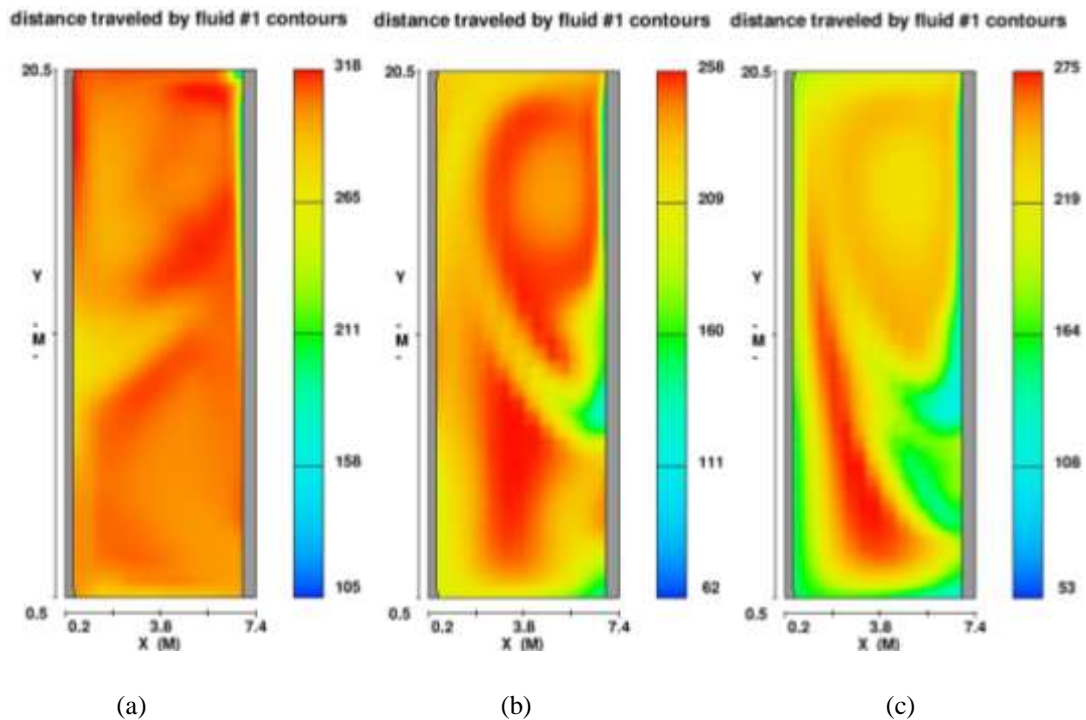


Figura 69. Distancia recorrida por el fluido en un plano horizontal intermedio entre las salidas y la entrada (1.5 m sobre la solera) para un tamaño de malla de 0.4 m: (a) modelo laminar, (b) modelo  $k-\epsilon$  y (c) modelo RNG  $k-\epsilon$

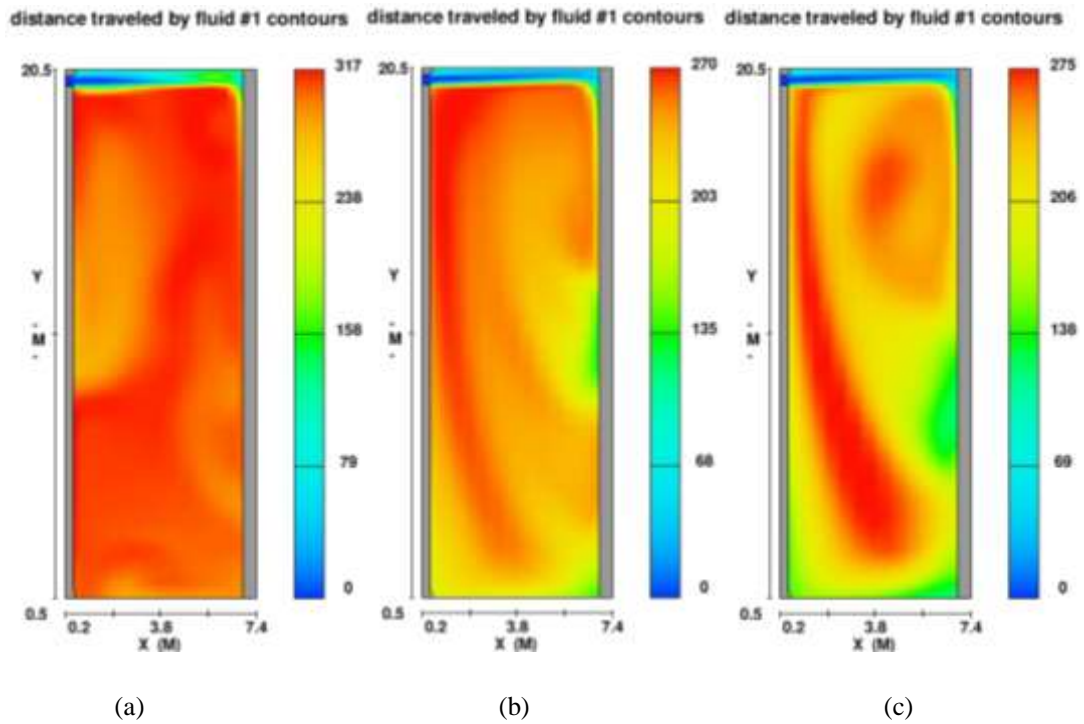


Figura 70. Distancia recorrida por el fluido en un plano horizontal a nivel de la entrada (2.8 m sobre la solera) para un tamaño de malla de 0.4 m: (a) modelo laminar, (b) modelo  $k-\varepsilon$  y (c) modelo RNG  $k-\varepsilon$

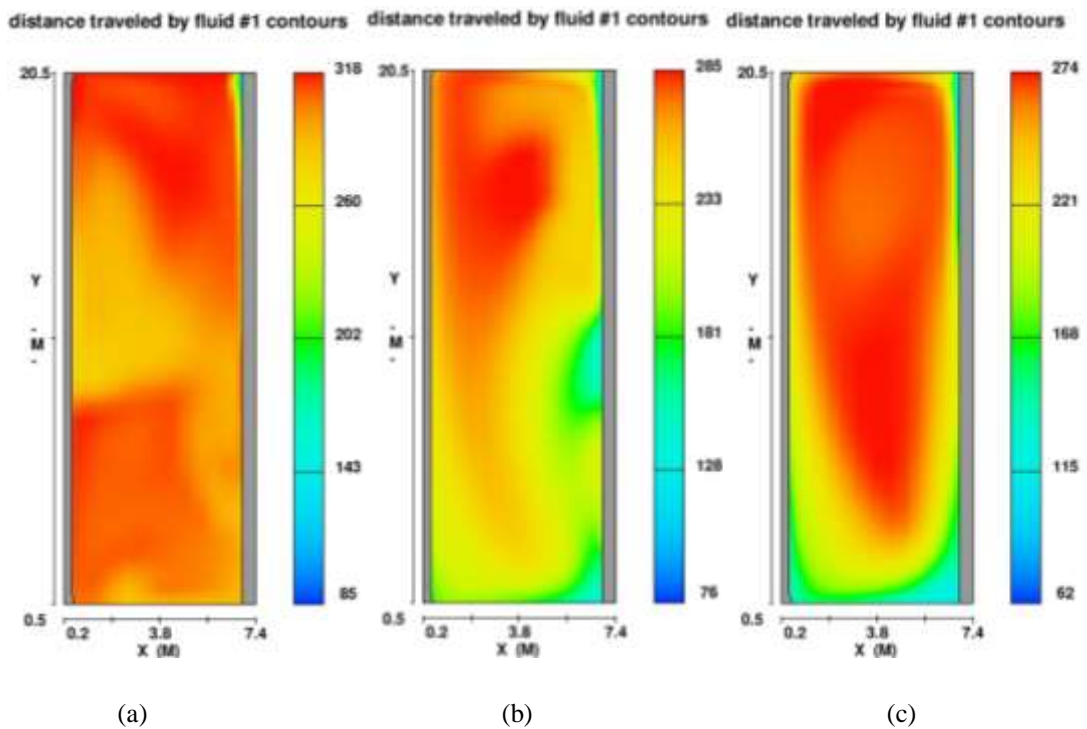


Figura 71. Distancia recorrida por el fluido en un plano horizontal entre la entrada y la superficie libre (3.5 m sobre la solera) para un tamaño de malla de 0.4 m: (a) modelo laminar, (b) modelo  $k-\varepsilon$  y (c) modelo RNG  $k-\varepsilon$

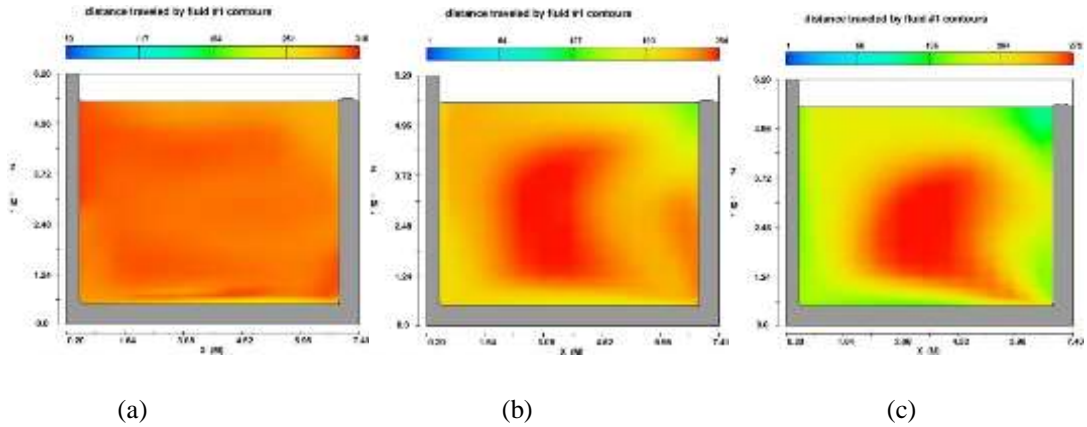


Figura 72. Distancia recorrida por el fluido en un plano longitudinal a 2.5 m de la pared exterior para un tamaño de malla de 0.4 m: (a) modelo laminar, (b) modelo  $k-\epsilon$  y (c) modelo RNG  $k-\epsilon$

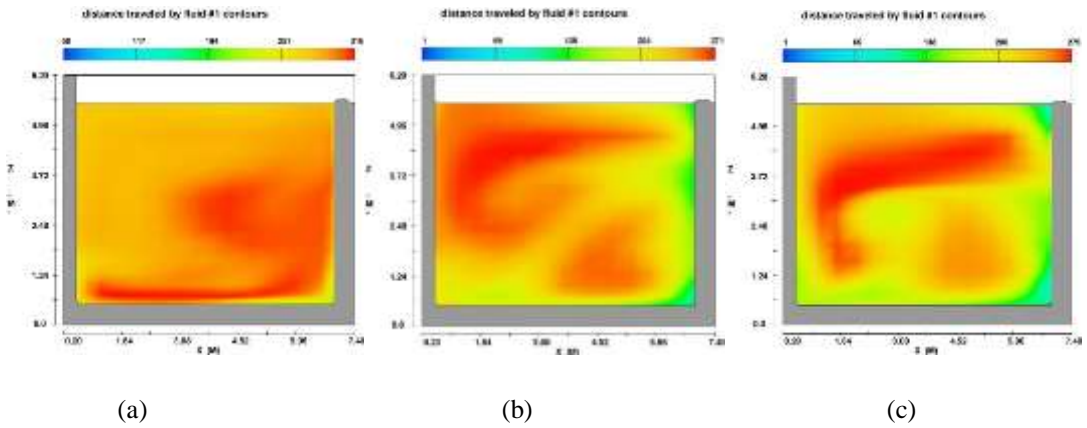


Figura 73. Distancia recorrida por el fluido en un plano longitudinal a mitad de la cámara para un tamaño de malla de 0.4 m: (a) modelo laminar, (b) modelo  $k-\epsilon$  y (c) modelo RNG  $k-\epsilon$

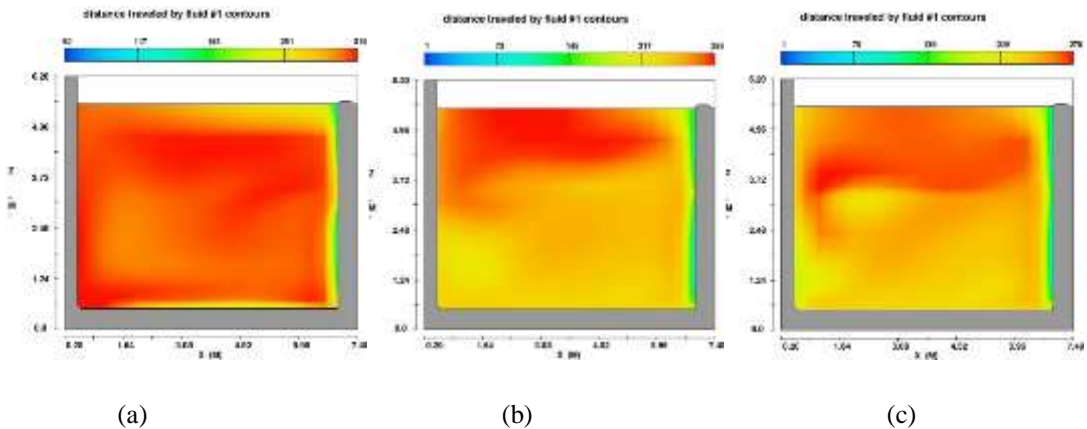


Figura 74. Distancia recorrida por el fluido en un plano longitudinal a 2.5 m de la pared interior para un tamaño de malla de 0.4 m: (a) modelo laminar, (b) modelo  $k-\epsilon$  y (c) modelo RNG  $k-\epsilon$



## 8. CONCLUSIONES

---

Tras la revisión bibliográfica realizada se pone de manifiesto el auge experimentado en la aplicación de herramientas CFD en el ámbito del tratamiento de aguas residuales. Una de las principales ventajas que aporta la incorporación de este tipo de herramientas en el análisis del comportamiento del flujo es que permiten el estudio de problemas a escala real, así como modificar escenarios y geometría, en contraposición de lo que ocurre al llevar a cabo estudios experimentales con prototipos de alto coste. De este modo, los detalles de diseño de cada una de las unidades pueden ser verificados u optimizados en un modelo CFD, antes de la implementación a gran escala, consiguiendo la máxima calidad y eficiencia del proceso de depuración.

Se debe destacar la necesidad de efectuar un proceso cuidadoso de calibración para garantizar la calidad en los resultados, y la validación de los mismos en campañas experimentales. Si bien es cierto, la toma de datos a escala real resulta complicada y a menudo se recurre al empleo de prototipos a escala reducida. Además, cobra especial importancia las investigaciones realizadas para evaluar la sensibilidad de la malla, a fin de lograr un equilibrio entre el tiempo de cálculo y la calidad de los resultados obtenidos.

En el caso particular del reactor biológico estudiado a lo largo de este trabajo, se pone de manifiesto la influencia que los modelos de turbulencia y el tamaño de malla ejercen sobre los valores de determinadas variables.

Según los resultados obtenidos, el modelo laminar tiende a obtener el menor tiempo de retención hidráulico en relación al resto de modelos, considerando mayor velocidad del fluido en el interior de la cámara y una mayor distancia recorrida por el fluido. Esto último puede estar motivado por la dificultad de este modelo a reproducir curvaturas en las líneas de corriente. El comportamiento observado por el modelo  $k-\varepsilon$  y RNG  $k-\varepsilon$  es similar, caracterizado por un aumento del tiempo de retención hidráulico y una disminución de la velocidad y la distancia recorrida por el fluido. Los resultados proporcionados por el modelo RNG  $k-\varepsilon$  están menos influenciados por el tamaño de malla como así se ha podido comprobar al analizar los errores relativos respecto al tamaño de malla más fino. Asimismo, como revela el índice de convergencia de la malla, con el modelo RNG  $k-\varepsilon$  se logra la convergencia de los resultados en la mayoría de los casos, siendo por tanto su uso el más recomendado.

En relación al tamaño de malla, generalmente el tamaño de malla de 0.6 m resulta menos preciso, siendo por tanto el error relativo considerable. Es por ello que, teniendo en cuenta los errores relativos para el tamaño de malla de 0.5 m y la duración de las simulaciones, que se incrementa más de un 20% al pasar de un tamaño de malla de 0.5 m a 0.4 m, el tamaño de malla más recomendado para abordar este estudio podría ser el de 0.5 m.

## 9. FUTUROS DESARROLLOS

---

Teniendo en cuenta el potencial de las herramientas de dinámica de fluidos computacional, los futuros desarrollos irán enfocados a la mejora del modelo numérico a fin de conseguir que este resulte representativo del fenómeno físico sujeto a estudio. Los aspectos a abordar serían los siguientes:

- Extender el modelo al resto del reactor pudiendo analizar el comportamiento hidrodinámico de la cámara anóxica y aerobia, lo que permitirá tener un mayor conocimiento acerca del comportamiento hidrodinámico general del mismo y por tanto, formular propuestas de mejora que persiguen alcanzar la mayor eficiencia del proceso de depuración. Además, se pueden extraer nuevos criterios de diseño que complementen a la formulación empleada tradicionalmente para el dimensionamiento de este tipo de infraestructuras.
- Llevar a cabo una campaña experimental en la EDAR o con un modelo reducido a escala de laboratorio. Esto es esencial para calibrar y validar el modelo, comprobando si las hipótesis de partida, así como los parámetros y modelos considerados, son los más apropiados para reproducir el patrón de flujo real observado. Esta fase podría incluir la interpretación de las distribuciones del tiempo de residencia obtenidas mediante técnicas de trazadores, así como el análisis de los distintos índices hidráulicos propuestos en la literatura para evaluar el rendimiento de las unidades de tratamiento de aguas residuales.
- Incorporar el efecto de la agitación y la aireación. La influencia de la fase gaseosa, particularmente en la aireación, puede tener un fuerte impacto en la densidad y en la cantidad de movimiento del fluido (Samstag et al., 2016).
- Estudiar el comportamiento hidrodinámico del reactor mediante un modelo multifásico que incorpore el impacto de la fase sólida.
- Abordar la cinética de reacciones para analizar la variación de  $\text{DBO}_5$ , nitrógeno, fósforo, etc, a lo largo del reactor.

---

## 10. BIBLIOGRAFÍA

---

- Alasino, N. (2009). *Síntesis y diseño de plantas de tratamiento de aguas residuales*. Tesis doctoral, Universidad Nacional del Litoral, Ingeniería Química, Santa Fe (Argentina).
- Asano, T., Burton, F., Leverenz, H., Tsuchihashi, R., & Tchobanoglous, G. (2007). *Water Reuse: Issues, Technologies, and Applications*. USA: McGraw-Hill Education.
- Azargoshab, H., Mousavi, S., Amani, T., Jafari, A., & Nosrati, M. (2015). Three-phase CFD simulation couple with population balance equations of anaerobic syntrophic acidogenesis and methanogenesis reactions in a continuous stirred bioreactor. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 27, 207-217.
- Barnard, J. (1974). Cut P and N without chemicals. *Water and Wastes Engineering*, 11, 33 a 36.
- Brannock, M., Wang, Y., & Leslie, G. (2010). Mixing characterisation of full-scale membrane bioreactors: CFD modelling with experimental validation. *Water Research*, 44, 3181-3191.
- Bridgeman, J. (2012). Computational fluid dynamics modelling of sewage sludge mixing in an anaerobic digester. *Advances in Engineering Software*, 44, 54-62.
- Carrillo, J. (2010-2012). *Trabajo Fin de Período Formativo*. Grupo de Investigación en Ingeniería Hidráulica Marítima y Medioambiental, Hidr@m, Universidad Politécnica de Cartagena, Ingeniería Civil .
- Chiva, S., Berlanga, J., Martínez, R., & Climent, J. (2018). *Depuración de Aguas Residuales: Digestión Anaerobia*. Publicaciones de la Universidad Jaime I.
- Cockx, A., Do-Quang, Z., Audic, J., Liné, A., & Roustan, M. (2001). Global and local mass transfer coefficients in waste water treatment process by computational fluid dynamics. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, 40, 187-194.
- Constitución Española. ( 29 de diciembre de 1978). En *Boletín Oficial del Estado «BOE» núm. 311*.
- Coughtrie, A., Borman, D., & Sleight, P. (2013). Effects of turbulence modelling on prediction of flow characteristics in a bench-scale anaerobic gas-lift digester. *Bioresource Technology*, 138, 297-306.
- Craig, K., Nieuwoudt, M., & Niemand, L. (2013). CFD simulation of anaerobic digester with variable sewage sludge rheology. *Water Research*, 47, 4485-4497.

- Dapelo, D., Alberini, F., & Bridgeman, J. (2015). Euler-Lagrange CFD modelling of unconfined gas mixing in anaerobic digestion. *Water Research*, 85, 497-511.
- Directiva 2000/60/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 23 de octubre de 2000, por la que se establece un marco comunitario de actuación en el ámbito de la política de aguas. (s.f.). En *Diario Oficial n° L 327 de 22/12/2000 p. 0001 - 0073*.
- Directiva 2006/7/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 15 de febrero de 2006, relativa a la gestión de la calidad de las aguas de baño y por la que se deroga la Directiva 76/160/CEE. (s.f.). En *Diario Oficial n° L 64 de 4/03/2006, p. 37/51*.
- Directiva 76/160/CEE del Consejo, de 8 de diciembre de 1975, relativa a la calidad de las aguas de baño. (s.f.). En *Diario Oficial n° L 31 de 05/02/1976*.
- Directiva 86/278/CEE del Consejo, de 12 de junio de 1986, relativa a la protección del. (s.f.). En *Diario Oficial n° L 181 de 04/07/1986 p. 0006 - 0012*.
- Directiva 91/271/CEE del Consejo, de 21 de mayo de 1991, sobre el tratamiento de las aguas residuales urbanas. (s.f.). En *Diario Oficial n° L 135 de 30/05/1991, p. 40/52*.
- EPSAR. Entidad Pública de Saneamiento de Aguas Residuales de la Comunidad Valenciana. (2018). *Ficha técnica de la EDAR de Alacant (Rincón de León)*. Obtenido de <http://www.epsar.gva.es/sanejament/instalaciones/edar.aspx?id=5>
- Flow Science, Inc. (2015). *FLOW-3D User Manual v11.1.0*.
- Flow Science, Inc. (2016). *FLOW-3D User Manual v11.2.0*.
- Grady, C., Daigger, G., Love, N., & Filipe, C. (2011). *Biological Wastewater Treatment* (Third Edition ed.). London: IWA Publishing and CRC Press Taylor & Francis Group.
- Granel, R. (2014). *Análisis del flujo ambiental y propuesta metodológica para simulaciones CFD aplicadas a la ventilación natural de invernaderos*. Tesis doctoral, Universidad Politécnica de Valencia, Ingeniería Rural y Agroalimentaria, Unidad de Ingeniería Hidráulica.
- Hirt, C., & Nichols, B. (1981). Volume of fluid (VOF) method for the dynamics of free boundaries. *Journal of Computational Physics*, 39, 201-225.
- Hurtado, F., Kaiser, A., & Zamora, B. (2015). Fluid dynamic analysis of a continuous stirred tank reactor for technical optimization of wastewater digestion. *Water Research*, 71, 282-293.
- Kaiser, A., & Zamora, B. (2007). *Simulación numérica del flujo convectivo turbulento establecido en sistemas pasivos de climatización*. Grupo de Investigación de

- Mecánica de Fluidos del Departamento de Ingeniería Térmica y de Fluidos de la Universidad Politécnica de Cartagena.
- Kargi, F., Uygur, A., & Baskaba, H. (2005). Phosphate uptake and release rates with different carbon sources in biological nutrient removal using a SBR. (ELSEVIER, Ed.) *Journal of Environmental Management*.
- Karim, K., Thoma, G., & Al-Dahhan, M. (2007). Gas-Lift digester configuration effects on mixing effectiveness. *Water Research*, 41, 3051-3060.
- Karim, K., Varma, R., Vesvikar, M., & Al-Dahhan, M. (2004). Flow pattern visualization of a simulated digester. *Water Research*, 38, 3659-3670.
- Karpinska, A., & Bridgeman, J. (2016). CFD-aided modelling of activated sludge systems – A critical review. *Water Research*, 88, 861-879.
- Karpinska, A., & Bridgeman, J. (2017). Towards a robust CFD model for aeration tanks for sewage treatment – a lab-scale study. *Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics*, 11, 371-395.
- Karpinska, A., & Bridgeman, J. (2018). CFD as a Tool to Optimize Aeration Tank Design and Operation. *Journal of Environmental Engineering*, 144.
- Kolmogorov, A. N. (1941). Local structure of turbulence in incompressible viscous. *Doklady Akademiya Nauk SSSR* 30, 299-303.
- Lauder, B., & Spalding, D. (1974). The numerical computation of turbulent flows. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 3, 269-289.
- Laurent, J., Samstag, R., Ducoste, J., Griborio, A., Nopens, I., Batstone, D., . . . Potier, O. (2014). A protocol for the use of computational fluid dynamics as a supportive tool for wastewater treatment plant modelling. *Water Science & Technology*, 70, 1575-1584.
- Lei, L., & Ni, J. (2014). Three-dimensional three-phase model for simulation of hydrodynamics, oxygen mass transfer, carbon oxidation, nitrification and denitrification in an oxidation ditch. *Water Research*, 53, 200-214.
- Ley 22/2011, de 28 de julio, de residuos y suelos contaminados. (29 de Julio de 2011). En *Boletín Oficial del Estado «BOE»* núm. 181.
- Ley 29/1985, de 2 de agosto, de Aguas. (8 de agosto de 1985). En *Boletín Oficial del Estado «BOE»* núm. 189 (pág. 25123 a 25135).
- Metcalf & Eddy, Inc. (1996). *Ingeniería de Aguas Residuales. Tratamiento, Vertido y Reutilización*. México: McGraw-Hill.
- Metcalf & Eddy, Inc. (2000). *Ingeniería de aguas residuales. Tratamiento, vertido y reutilización* (3ª edición ed.). Madrid: McGraw-Hill.

- Metcalf & Eddy, Inc. (2004). *Wastewater Engineering: Treatment and Reuse*. (4th Edition ed.). New York: McGraw-Hill.
- Pedreño, A. (2014). *Anteproyecto: Diseño y cálculo de una estación depuradora de aguas residuales en la Región de Murcia*. Trabajo Fin de Máster, Universidad Politécnica de Cartagena.
- Ratkovich, N., & Bentzen, T. (2013). Comparison of four types of membrane bioreactor systems in terms of shear stress over the membrane surface using computational fluid dynamics. *Water Science & Technology*, 68, 2534-2544.
- Ratkovich, N., Horn, W., Helmus, F., Rosenberg, S., Naessens, W., Nopens, I., & Bentzen, T. (2013). Activated Sludge Rheology: A critical review on data collection and modelling. *Water Research*, 47, 463-482.
- Real Decreto-ley 11/1995, de 28 de diciembre, por el que se establecen las normas aplicables al tratamiento de las aguas residuales urbanas. ( 30 de diciembre de 1995). En *Boletín Oficial del Estado «BOE»* núm. 312 (pág. 37517 a 37519).
- Resolución de 14 de junio de 2001, de la Secretaría General de Medio Ambiente, por la que se dispone la publicación del Acuerdo de Consejo de Ministros, de 1 de junio de 2001, por el que se aprueba el Plan Nacional de Lodos de Depuradoras de Aguas Residua. ( 12 de julio de 2001). En *Boletín Oficial del Estado «BOE»* núm. 166 (pág. 25297 a 25304).
- Roache, P. (1994). Perspective: A Method for Uniform Reporting of Grid Refinement Studies. *Journal of Fluids Engineering*, 116, 405-413.
- Romero, J. (2000). *Tratamiento de Aguas Residuales: Teoría y principios de diseño*. Escuela colombiana de Ingeniería.
- Samstag, R., Ducoste, J., Griborio, A., Nopens, I., Batstone, D., Wicks, J., . . . Laurent, J. (2016). CFD for wastewater treatment: An overview. *Water Science & Technology*, 74, 549-563.
- Sánchez, F., Viedma, A., & Kaiser, A. (2016). Hydraulic characterization of an activated sludge reactor with recycling system by tracer experiment and analytical models. *Water Research*, 101, 382-392.
- Srinivas, T. (2008). *Environmental Biotechnology* (1st Edition ed.). New Age International Pvt Ltd Publishers.
- Stern, L., & Marais, G. (1974). Sewage as the electron donor in biological denitrification. Research Report W7, Univ.of Cape Town.
- Terashima, M., Goel, R., Komatsu, K., Yasui, H., Takahashi, H., Li, Y., & Noike, T. (2009). CFD simulation of mixing in anaerobic digesters. *Bioresource Technology*, 100, 2228-2233.

- Tu, J., Yeoh, G.-H., & Liu, C. (2018). *Computational Fluid Dynamics: A Practical Approach* (Third Edition ed.). Butterworth-Heinemann.
- van Haandel, A., & van der Lubbe, J. (2012). *Handbook of Biological Wastewater Treatment: Design and optimization of Activated Sludge Systems* (2nd Edition ed.). London: IWA Publishing.
- van Haandel, A., Ekama, G., & Marais, G. (1981). The activated sludge process part 3 - Single sludge denitrification. *Water Research*, *15*, 1135-1152.
- Venegas, C. (2015). *Eliminación biológica de nutrientes en aguas residuales con alto contenido de nitrógeno amoniacal utilizando un reactor biológico secuencial*. Tesis Doctoral, Universidad de Cantabria, Ciencias y Técnicas del Agua y del Medio Ambiente.
- Versteeg, H., & Malalasekera, W. (1995). *An Introduction to Computational Fluid Dynamics: The Finite Volume Method Approach* (1st Edition ed.). Pearson.
- Versteeg, H., & Malalasekera, W. (2007). *An Introduction to Computational Fluid Dynamics: The Finite Volume Method* (2nd Edition ed.). Pearson.
- Vesvikar, M., & Al-Dahhan, M. (2005). Flow pattern visualization in a mimic anaerobic digester using CFD. *Biotechnology and Bioengineering*, *89*, 719-732.
- Wanner, J. (1997). Microbial population dynamics in biological wastewater treatment. (T. Cloete, & N. Muyima, Edits.) *Microbial Community Analysis: The Key to the Design of Biological Wastewater Treatment Systems, Scientific and Technical Report*.
- Wicklein, E., Batstone, D., Ducoste, J., Laurent, J., Griborio, A., Wicks, J., . . . Nopens, I. (2016). Good modelling practice in applying computational fluid dynamics for WWTP modelling. *Water Science & Technology*, *73*, 969-982.
- Wu, B. (2010). CFD simulation of gas and non-Newtonian fluid two-phase flow in anaerobic digesters. *Water Research*, *44*, 3861-3874.
- Wu, B. (2012). Advances in the use of CFD to characterize, design and optimize bioenergy systems. *Computers and Electronics in Agriculture*, *93*, 195-208.
- Wu, B. (2014). CFD simulation of gas mixing in anaerobic digesters. *Computers and Electronics in Agriculture*, *109*, 278-286.
- Wu, B., & Chen, S. (2008). CFD simulation of non-Newtonian fluid flow in anaerobic digesters. *Biotechnology and Bioengineering*, *99*, 700-711.
- Yang, Y., Yang, J., Zuo, J., Li, Y., He, S., Yang, X., & Zhang, K. (2011). Study on two operating conditions of a full-scale oxidation ditch for optimization of energy

- consumption and effluent quality by using CFD model. *Water Research*, 45, 3439-3452.
- You, S., Hsu, C., Chuang, S., & Ouyang, C. (2003). Nitrification efficiency and nitrifying bacteria abundance in combined AS-RBC and A2O systems. *Water Research*, 37, 2281-2290.
- Yu, L., Ma, J., & Chen, S. (2011). Numerical simulation of mechanical mixing in high solid anaerobic digester. *Bioresource Technology*, 102, 1012-1018.
- Yu, L., Ma, J., Frear, C., Zhao, Q., Dillon, R., Li, X., & Chen, S. (2013). Multiphase modeling of settling and suspension in anaerobic digester. *Applied Energy*, 111, 28-39.
- Zalakain, G. (2010). Ampliación de la capacidad de los tratamientos biológicos de fangos activos empleando soportes móviles para eliminación de nutrientes. *Retema: Revista técnica de medio ambiente*.