

MÁSTER UNIVERSITARIO EN INGENIERÍA INDUSTRIAL

TRABAJO FIN DE MÁSTER

SIMULACIÓN CFD DEL FLUJO DE FLUIDO EN EL INTERIOR DE UN DECANTADOR CIRCULAR

Estudiante
Director
Departamento
Curso académico

Fernández, Perea, Iñigo
Peña, Bandrés, Alberto
Ingeniería Energética
2021 - 2022

Bilbao, 15 de septiembre de 2022

RESUMEN

El proyecto que se presenta en este documento contiene el desarrollo de una modelización de un decantador circular realizada mediante software CFD, situado en una planta piloto de tratamiento de aguas, con el objetivo de conocer su funcionamiento en profundidad. A través de dicha simulación, se trata de reproducir el comportamiento hidrodinámico del equipo que permita estudiar sentidos de flujo y campos de velocidades, con diferentes configuraciones de altura de un elemento que se encuentra en el interior del decantador denominado bandaje.

Debido a la complejidad de modelar todos los fenómenos físicos que ocurren en el dispositivo, se establecen posibles futuras líneas de investigación que continúen el estudio en profundidad del funcionamiento del decantador.

Palabras clave: potabilización, decantación, mecánica de fluidos computacional, CFD, simulación, líneas de flujo, decantador, campo de velocidades, ETAP, planta piloto, industria 4.0.

LABURPENA

Dokumentu honetan aurkezten den proiektuak CFD softwarearen bidez egindako dekantagailu zirkular baten modelizazioaren garapena jasotzen du, haren funtzionamendu sakona ezagutzeko helburuarekin. Dekantagailua uren tratamendurako instalazio pilotu batean kokatua dago. CFD simulazioaren bidez, tresneriaren portaera hidrodinamiko erreproduzitu nahi da, fluxu-zentzumenak eta abiadura-eremuak aztertu ahal izateko, bandaje izeneko dekantagailuaren barruan dagoen elementu baten altuera-konfigurazio desberdinekin.

Gailuan gertatzen diren fenomeno fisiko guztiak modelatzea oso konplexua denez, etorkizuneko ikerketa-ildoak ezartzen dira dekantagailuaren funtzionamendua sakonki aztertzen jarraitzeko.

Hitz gakoak: Dekantazio, uraren arazketa, Fluidoaren Mekanika Konputazionala, CFD, Simulazioa, Fluxu-zentzumena, dekantadorea, abiadura-eremua, EUTE, instalazio pilotua, industria 4.0.

ABSTRACT

The project displayed in this document contains a study carried out based on CFD simulations concerning a circular settling tank. The clarifier is located in a pilot water treatment plant owned by Consorcio de Aguas Bilbao Bizkaia (CABB). Reaching an extensive knowledge of the operation of the equipment is configured as the main goal of this research. Through these simulations, it is intended to reproduce the hydrodynamics of the equipment. This allows analyzing flow directions and velocity profile considering different height configurations of an element called impeller flow regulator.

Due to the complex physics taking place inside the settling tank, several future lines of research are established in order to keep studying its operation.

Keywords: drinking water treatment, computational fluid dynamics, CFD, simulation, settling tank, clarifier, streamlines, velocity field, DWTP, pilot plant, industry 4.0.

ÍNDICE

RESUMEN.....	2
LABURPENA.....	2
ABSTRACT	3
ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	7
ÍNDICE DE TABLAS	11
1. INTRODUCCIÓN.....	12
2. CONTEXTO.....	14
2.1. Funcionamiento de una Estación de Tratamiento de Agua Potable	15
2.1.1. Caracterización de las aguas superficiales	16
2.1.2. Caracterización de las aguas de consumo humano	16
2.1.3. Etapas principales en el funcionamiento de una ETAP	19
2.2. Principios de la decantación	21
2.3. Descripción de la Planta Piloto de Etxebarri	23
2.3.1. Localización de la Planta Piloto de Etxebarri	23
2.3.2. Línea de tratamiento de la Planta Piloto.....	24
2.3.3. Decantador circular.....	27
2.3.4. Funcionamiento del decantador	30
2.4. Industria 4.0	32
2.4.1. Tecnologías clave.....	32
2.5. La Agenda 2030: los objetivos de desarrollo sostenible (ODS) y sus metas.	34
3. OBJETIVOS	38
4. ALCANCE	38
5. ESTADO DEL ARTE.....	40
5.1. Tipos de decantadores.....	40
5.1.1. Decantadores estáticos	40
5.1.2. Decantadores por contacto de fangos	41
5.2. Estudios relacionados	43
6. EN QUÉ CONSISTE EL CFD.....	46

6.1. ¿Qué es el CFD?.....	46
6.2. Filosofía de uso.....	46
6.3. Impacto actual de esta tecnología.....	47
6.4. Visión general de un código de CFD.....	50
6.5. Bases teóricas del CFD.....	51
6.5.1. Conservación de la masa:.....	52
6.5.2. Conservación de la cantidad de movimiento.....	52
6.5.3. Conservación del momento angular	53
6.5.4. Ecuaciones de Navier-Stokes.....	53
6.6. Software CFD elegido	55
7. GEOMETRÍA.....	56
7.1. Consideraciones previas.....	56
7.2. Geometrías elaboradas	61
7.2.1. Geometría media.....	63
8. MALLADO	67
9. MODELOS FÍSICOS.....	71
10. CONDICIONES DE CONTORNO.....	75
11. RESULTADOS.....	77
11.1. Consideraciones previas	77
11.1.1. Altura de lámina de agua	77
11.1.2. Inicialización de la presión hidrostática	78
11.1.3. Características del ordenador	79
11.1.4. Velocidad de la turbina.....	79
11.2. Simulaciones de la geometría media.....	81
11.2.1. Posición bandaje 0 cm	81
11.2.2. Posición bandaje 1 cm	86
11.2.3. Posición bandaje 2 cm	89
11.2.4. Posición bandaje 3 cm	92
11.2.5. Posición bandaje 4 cm	96
11.2.6. Posición bandaje 5 cm	101

11.2.7. Posición bandaje 6 cm	104
11.2.8. Posición bandaje 7 cm	109
11.2.9. Posición bandaje 8 cm	112
11.3. Validación de resultados.....	116
12. LÍNEAS FUTURAS DE INVESTIGACIÓN.....	119
13. PRESUPUESTO.....	120
14. GANTT	121
15. CONCLUSIONES	123
16. BIBLIOGRAFÍA.....	124

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1: Etapas principales en el funcionamiento de una ETAP (Dip. Bad., 2022).....	20
Ilustración 2: Ubicación de la planta piloto de Etxebarri.....	23
Ilustración 3: Vista panorámica de la planta piloto, en la parte izquierda de la fotografía y su entorno.....	24
Ilustración 4: Vista general de la Planta Piloto de Etxebarri.....	25
Ilustración 5: Diagrama de proceso de tratamiento de la planta piloto de Etxebarri.....	26
Ilustración 6: Plano 3D del decantador de la planta piloto de Etxebarri.....	27
Ilustración 7: Sección vertical del decantador de la planta piloto de Etxebarri...28	
Ilustración 8: Detalle de sección horizontal del decantador por la zona de la turbina	29
Ilustración 9: Detalle de sección vertical por zona de turbina.	29
Ilustración 10: Corte horizontal del decantador de la planta piloto de Etxebarri 30	
Ilustración 11: Parte superior del decantador de la Planta piloto de Etxebarri en su funcionamiento ordinario.....	31
Ilustración 12: Tecnologías clave de la Industria 4.0	33
Ilustración 13: Etapas del diseño del modelo 3D del decantador de la Planta Piloto de Etxebarri.....	38
Ilustración 14: Modelos 3D realizados, con la geometría simulada en azul oscuro.	39
Ilustración 15: Decantador estático de rasquetas	41
Ilustración 16: Decantador tipo Acclerator de la 2ª Fase de la ETAP de Venta Alta	42
Ilustración 17: Diseño mediante simulación CFD del barco del equipo de vela de la Copa América INEOS TEAM UK	48
Ilustración 18: Simulación CFD de un traje de baño para natación de alto nivel asistido.....	48
Ilustración 19: Validación clínica de la hemodinámica de la aorta mediante CFD	49
Ilustración 20: Simulación CFD aerogenerador.....	49
Ilustración 21: Etapas en la modelización CFD de un proceso.....	51
Ilustración 22: Simulación de un ventilador industrial en el software Star CCM+	55
Ilustración 23: Geometría preparada por el departamento de delineación de la empresa.....	56
Ilustración 24: Errores de importación de la geometría 3D	57

Ilustración 25: Posición del origen de las coordenadas, situada en el centro del fondo del decantador	58
Ilustración 26: Creación del sketch del bandaje regulable en el software Star CCM+	59
Ilustración 27: Creación de la estructura final del bandaje mediante revolucionado del sketch	59
Ilustración 28: Altura de regulación del bandaje	60
Ilustración 29: (izq.) interior del decantador vacío, (dcha.) varillas de regulación del bandaje.....	60
Ilustración 30: diferentes posiciones del bandaje regulable de la turbina	62
Ilustración 31: Operaciones realizadas en el programa 3D-CAD	63
Ilustración 32: modelo 3D del decantador, en su geometría media.....	64
Ilustración 33: Modelo 3D de la turbina o agitador.....	64
Ilustración 34: Geometría auxiliar que rodea o envuelve la turbina, señalada de color amarillo.....	65
Ilustración 35: partes principales del decantador: entrada de agua bruta (marcada en rojo), la salida de agua decantada (marcada en granate), la salida de rebose de agua (marcada en fucsia) y la "tapa" del decantador (marcada en naranja)	66
Ilustración 36: a) modelo 3D utilizado y b) su mallado	68
Ilustración 37: Mallado interior del decantador	69
Ilustración 38: Detalle del mallado en la zona de la turbina	70
Ilustración 39: Ventana de selección de modelos físicos en el Star CCM+	71
Ilustración 40: Localización de la turbina (en color rosa) y la región que la envuelve (en color amarilla) en el interior del decantador.....	73
Ilustración 41: Árbol de selección de condiciones de contorno.....	75
Ilustración 42: situación inicial con el decantador lleno hasta una altura de 2,55 m.....	78
Ilustración 43: distribución de las presiones en el interior del decantador	78
Ilustración 44: Sección del decantador en la pantalla del SCADA de la planta piloto	79
Ilustración 45: Simulaciones realizadas con velocidades erróneas	80
Ilustración 46: Posición del bandaje (marcado en color marrón) en el interior del decantador.....	81
Ilustración 47: Campo de velocidades en el interior del decantador (bandaje cerrado)	82
Ilustración 48: Sentidos de flujo del fluido en el interior del decantador (bandaje cerrado)	82
Ilustración 49: detalle del flujo en la zona de la turbina (bandaje cerrado).....	83

Ilustración 50: detalle del flujo en la zona del bandaje regulado a 0 cm	84
Ilustración 51: Campo de velocidades en sección horizontal a la altura de la turbina (bandaje cerrado).....	85
Ilustración 52: Campo de velocidades en sección horizontal de la parte superior del decantador (bandaje cerrado)	85
Ilustración 53: Campo de velocidades en el interior del decantador (bandaje a 1 cm)	86
Ilustración 54: Sentidos de flujo del fluido en el interior del decantador (bandaje a 1 cm).....	87
Ilustración 55: detalle del flujo en la zona de la turbina (bandaje a 1 cm).....	88
Ilustración 56: detalle del flujo en la zona del bandaje regulado a 1 cm	88
Ilustración 57: Decantador lleno de agua.....	89
Ilustración 58: Campo de velocidades en el interior del decantador (bandaje a 2 cm)	90
Ilustración 59: Sentidos de flujo del fluido en el interior del decantador (bandaje a 2 cm).....	90
Ilustración 60: detalle del flujo en la zona de la turbina (bandaje a 2 cm).....	91
Ilustración 61: detalle del flujo en la zona del bandaje regulado a 2 cm	92
Ilustración 62: Campo de velocidades (a) en el interior del decantador (bandaje a 3 cm)	93
Ilustración 63: Campo de velocidades (b) en el interior del decantador (bandaje a 3 cm)	93
Ilustración 64: detalle del flujo en la zona de la turbina (bandaje a 3 cm).....	94
Ilustración 65: detalle del flujo en la zona del bandaje regulado a 3 cm	95
Ilustración 66: líneas de flujo desde el interior de la campana (bandaje a 3 cm).96	
Ilustración 67: Campo de velocidades en el interior del decantador (bandaje a 4 cm)	97
Ilustración 68: Sentidos de flujo del fluido en el interior del decantador (bandaje a 4 cm).....	98
Ilustración 69: detalle del flujo en la zona de la turbina (bandaje a 4 cm).....	98
Ilustración 70: detalle del flujo en la zona del bandaje regulado a 4 cm	99
Ilustración 71: Campo de velocidades en sección horizontal por la zona de la turbina (bandaje a 6 cm)	100
Ilustración 72: Turbina real (izquierda), modelo 3D generado (derecha)	100
Ilustración 73: Posición del bandaje (marcado en color morado) en el interior del decantador.....	101
Ilustración 74: Campo de velocidades en el interior del decantador (bandaje a 5 cm)	102

Ilustración 75: Sentidos de flujo del fluido en el interior del decantador (bandaje a 5 cm).....	103
Ilustración 76: detalle del flujo en la zona de la turbina (bandaje a 5 cm).....	103
Ilustración 77: detalle del flujo en la zona del bandaje regulado a 5 cm	104
Ilustración 78: Campo de velocidades en el interior del decantador (bandaje a 6 cm)	105
Ilustración 79: Sentidos de flujo del fluido en el interior del decantador (bandaje a 6 cm).....	106
Ilustración 80: detalle del flujo en la zona de la turbina (bandaje a 6 cm).....	107
Ilustración 81: detalle del flujo en la zona del bandaje regulado a 6 cm	107
Ilustración 82: Campo de velocidades en sección horizontal a la altura de la turbina (bandaje a 6 cm)	108
Ilustración 83: Campo de velocidades en sección horizontal de la parte superior del decantador (bandaje a 6 cm).....	109
Ilustración 84: Campo de velocidades en el interior del decantador (bandaje a 7 cm)	110
Ilustración 85: Sentidos de flujo del fluido en el interior del decantador (bandaje a 7 cm).....	111
Ilustración 86: detalle del flujo en la zona de la turbina (bandaje a 7 cm).....	111
Ilustración 87: detalle del flujo en la zona del bandaje regulado a 7 cm	112
Ilustración 88: Posición del bandaje (marcado en color morado) en el interior del decantador.....	113
Ilustración 89: Campo de velocidades en el interior del decantador (bandaje a 8 cm)	114
Ilustración 90: Sentidos de flujo del fluido en el interior del decantador (bandaje a 8 cm).....	114
Ilustración 91: detalle del flujo en la zona de la turbina (bandaje a 8 cm).....	115
Ilustración 92: detalle del flujo en la zona del bandaje regulado a 8 cm	115
Ilustración 93: Líneas de flujo desde el interior de la campana (Bandaje a 8 cm)	116
Ilustración 94: Flujos teóricos del interior del decantador.....	117
Ilustración 95: Flujos simulados en el interior del decantador	118
Ilustración 96: Comparación flujo teórico vs flujo simulado.....	118
Ilustración 97: Diagrama de Gantt del proyecto	122

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Parámetros de calidad del agua de consumo humano.....	19
Tabla 2: Acciones para llevar a cabo los objetivos ODS, impacto en la empresa y sus indicadores.....	37
Tabla 3: Modelados 3D realizados, junto a la altura del bandaje y el N.º de celdas del mallado.....	67
Tabla 4: Presupuesto del proyecto	120
Tabla 5: Hitos para la realización del proyecto	121

1. INTRODUCCIÓN

A la hora de examinar la potabilización de aguas superficiales del río Nervión a su paso por el municipio de Etxebarri, el Consorcio de Aguas Bilbao Bizkaia (CABB) dispone de una instalación en la que ensayar el tratamiento que requiere este tipo de aguas, inferiores en calidad a las provenientes del sistema Zadorra, para posteriormente alimentar la Estación de Tratamiento de Agua Potable (ETAP) de Venta Alta mediante este recurso en determinadas circunstancias excepcionales tales como casos extremos de sequías, grandes mantenimientos en la red de embalses del Zadorra u otras incidencias.

La mencionada instalación se trata de una planta piloto de potabilización de aguas, erigida en 2018, que simula las condiciones de operación de la segunda línea de tratamiento de la ETAP de Venta Alta. En ella se dispone de equipos, a escala reducida, para tratar aguas con la garantía de calidad final requerida en la legislación comunitaria.

Entre estos equipos se encuentra un decantador circular de recirculación de fangos en donde se realiza la etapa de decantación-floculación, que es empleado para mejorar la calidad del agua al eliminar por gravedad los sólidos en suspensión que se encuentran en la misma. Tanto estos procesos de separación por gravedad como el propio funcionamiento interno de los decantadores son a menudo poco conocidos y basan su diseño en relaciones empíricas y experiencia previa de las empresas constructoras. Además, son variados y complejos los factores que reducen la eficacia de estos equipos como son la turbulencia creada por el flujo de entrada de agua, la succión del vertedero de salida, el viento o las variaciones de temperatura y de densidad del agua bruta.

Con el fin de llegar a comprender el funcionamiento interno en profundidad del decantador circular de la planta piloto de Etxebarri, se propone realizar una simulación de mecánica de fluidos computacional, en adelante, y por sus siglas en inglés, CFD (Computational Fluid Dynamics).

Este conocimiento profundo del equipo permite comprobar que los flujos de fluido en su interior coinciden con los previstos en teoría y ensayar los efectos que tienen las diversas posiciones de la pieza móvil que envuelve la turbina central que poseen este tipo de dispositivos llamada bandaje regulable.

Así mismo, este proyecto sienta precedente a posibles líneas de investigación futuras que permitan mejorar el desempeño del decantador circular de la planta piloto en ciertas situaciones en las que su funcionamiento no es óptimo y abre

camino a la introducción de otros estudios basados en simulaciones de mecánica de fluidos computacional en equipos de estaciones de tratamiento de agua potable del Consorcio de Aguas Bilbao Bizkaia (CABB).

2. CONTEXTO

El Consorcio de Aguas Bilbao Bizkaia (CABB) fue fundado el 17 de marzo de 1967, cuando la ya desaparecida Corporación Administrativa del Gran Bilbao junto a los diecinueve municipios que la conformaban, constituyeron una entidad pública con el fin de desarrollar y gestionar los servicios de abastecimiento de agua y saneamiento de la red primaria de aproximadamente un millón de habitantes del Territorio Histórico de Bizkaia (CABB, Reseña Histórica, 2022).

Por un lado, los servicios de abastecimiento comprenden desde la captación, embalse, transporte, tratamiento y conducción hasta usuarios finales o depósitos de cabecera en la red de distribución. Por otro lado, el saneamiento abarca colectores e interceptores generales, estaciones depuradoras de aguas residuales y emisarios.

Desde la creación del CABB, se han ido incorporando sucesivamente numerosas áreas tales como Uribe-Kosta, Arratia, Durangaldea, Encartaciones, Lea-Artibai, y, más recientemente, Busturialdea, de tal modo que en la actualidad el Consorcio lo integran 97 municipios, dando servicio a aproximadamente un millón de habitantes, lo que representa la práctica totalidad de la población de Bizkaia y cerca de la mitad dentro de la Comunidad Autónoma Vasca. Para completar el argumento de la importancia del CABB, está que abarca, adicionalmente, la mayor parte de empresas del sector industrial vizcaíno (CABB, Competencias, 2022).

Centrándonos más en el proyecto, el CABB dispone de una concesión que le permite captar un límite de 2 m³/s del río Nervión a su paso por Etxebarri, en circunstancias excepcionales como pueden ser: sequías extremas y prolongadas, labores de mantenimiento de la conducción de abastecimiento a Venta Alta o grandes reparaciones e imprevistos.

En la actualidad ya se encuentra en operación el bombeo requerido para elevar esta agua hasta la ETAP de Venta Alta en donde será tratada en un futuro y está ubicado dentro de la instalación de Bombeo y Turbinado Nerbioi-Ibaizabal, en la misma parcela que ocupa el tanque de tormentas de Etxebarri y la planta piloto, situados junto a la presa de Bolueta.

Esta nueva posibilidad de captación complementará las demás fuentes de las que dispone el CABB en la actualidad y permitirá mejorar la garantía de suministro de agua en caso de eventuales episodios de escasez de los recursos o paradas técnicas.

Con el fin de determinar si el tratamiento en la 2ª Fase de la ETAP de Venta Alta produciría un agua con las garantías de calidad requeridas al ser alimentada con agua del río Nervión, el Consorcio construyó entre 2017 y 2018 la Planta piloto de Etxebarri en donde ensayar previamente el tratamiento de esas aguas. Todo ello de cara a minimizar posibles riesgos en el suministro y calidad del agua.

Desde que fue erigida, en la planta piloto se han llevado a cabo distintos proyectos de I+D+i promovidos desde el propio CABB, empresas explotadoras o centros tecnológicos además de haberse realizado algunas ampliaciones y mejoras de las instalaciones. En la iteración más reciente, el Consorcio, apoyado en un convenio marco de colaboración que firmó con la Universidad del País Vasco con la finalidad de contribuir al fortalecimiento y desarrollo de la educación, formación e investigación, transformó la planta piloto en el Centro Avanzado de Tratamiento de Agua Bilbao Bizkaia (CATABB), tratando de dar un mayor impulso a la innovación poniendo las instalaciones a disposición de otros equipos de I+D+i.

Este proyecto se realiza bajo el paraguas del CATABB, clasificado como proyecto secundario con el nombre DeCaSim CFD (Decantador del CATABB Simulado mediante CFD), siendo apoyado así mismo por la sección de Ingeniería Nuclear y Mecánica de Fluidos ahora incluida en el departamento Ingeniería Energética de la Escuela de Ingeniería de Bilbao.

2.1. Funcionamiento de una Estación de Tratamiento de Agua Potable

Una Estación de Tratamiento de Aguas Potables (ETAP) es una instalación que realiza la potabilización del agua captada de los embalses u otras fuentes superficiales o subterráneas de modo que llegue a ser apta para el consumo humano, asegurando que el suministro de agua se produzca en las adecuadas condiciones sanitarias.

En las ETAP se eliminan las sustancias no deseadas que se encuentran en el agua de captación a través de diversos procesos físico químicos, teniendo en cuenta en todo momento la eficiencia en el consumo de energía. Como resultado de estos procesos, esas sustancias no deseadas acaban concentrándose en fangos, los cuales son sometidos a otros tratamientos adecuados a sus características.

A la hora de operar una ETAP, se utilizan tanto modelos matemáticos, que permiten tomar decisiones con una base científica y técnica, como sistemas de control tipo SCADA. Además, sirviéndose de las redes de comunicaciones

actuales, es posible realizar telecontrol y telemando sobre los equipos electromecánicos de la planta, siendo habitual la operación a distancia.

Adicionalmente, en una ETAP, se realiza el control de calidad del agua de salida sobre 49 parámetros biológicos, químicos, o físicos, para comprobar que sus características cumplen los requisitos exigidos en la legislación (Degrémont, 1979).

2.1.1. Caracterización de las aguas superficiales

Cada fuente de agua tiene unas características únicas, es por ello que las aguas superficiales destinadas a consumo de la población se clasifican en tres grupos, según la legislación vigente (Real Decreto 1541/1994, de 8 de julio, por el que se modifica el anexo número 1 del Reglamento de la Administración pública del agua y de la planificación hidrológica, aprobado por el Real Decreto 927/1988, de 29 de julio. Esta norma incorpora todas las posibles excepciones establecidas en la Directiva 75/440/CEE del Consejo, de 16 de junio, relativa a la calidad requerida para las aguas superficiales destinadas a la producción de agua potable en los Estados miembros), en función del grado de tratamiento requerido para considerarlas potables:

- **Tipo A1:** Mejor calidad, necesitan de un tratamiento físico simple y desinfección para potabilizarlas.
- **Tipo A2:** Calidad media, requieren de un tratamiento físico normal, tratamiento químico y desinfección.
- **Tipo A3:** Calidad deficiente, tienen los requerimientos más elevados en cuanto a potabilización necesitando de tratamientos fisicoquímicos intensivos, de afino y desinfección.

En el caso del agua del río Nervión a su paso por Etxebarri, su calidad es de tipo A3, inferior a la calidad del agua cuya procedencia es el sistema Zadorra (tipo A1), y que es el origen habitual del influente en Venta Alta. Consecuentemente con los tipos de aguas expuestos previamente, requerirá de un tratamiento físico y químico intensivos, afino y desinfección.

2.1.2. Caracterización de las aguas de consumo humano

El agua es un recurso fundamental para la vida y todas las personas debieran de disponerla de un modo accesible en suficiente cantidad y seguridad. Algo como mejorar el acceso al agua de consumo humano tiene como consecuencia un

beneficio para la salud de la población. Es por ello que se dedican grandes esfuerzos desde administraciones y empresas en garantizar que el agua de consumo humano sea segura, accesible y abundante.

Se denomina agua de consumo humano a todas aquellas aguas utilizadas para beber, preparar alimentos, higiene personal y otros usos domésticos, industria alimentaria, limpieza de superficies, objetos o materiales que puedan estar en contacto con alimentos (Consumo, 2002-2004).

Generalmente se considera que un agua potable debe de cumplir las siguientes características fisicoquímicas:

- **Incolora:** debe de ser transparente.
- **Inodora:** sus componentes no generan ningún olor.
- **Insípida:** no tiene ningún sabor.
- **Limpia y Segura:** consumirla o utilizarla en la producción de alimentos no supone riesgo alguno de contraer cualquier enfermedad.
- **Sin turbiedad:** no se presentan elementos en suspensión.
- **Sin contaminantes orgánicos, inorgánicos o radiactivos.**
- **Proporción de gases y sales disueltas determinada.**
- **Sin microorganismos patógenos.**

Todas estas cualidades que debe cumplir el agua para considerarla apta para el consumo humano se han ido plasmando en una serie de parámetros medibles que comprenden las características mencionadas establecidos por leyes regionales, estatales o comunitarias y que varían su exigencia en diferentes zonas del mundo.

2.1.2.1. Legislación acerca de aguas de consumo humano

En el caso de España, las aguas de consumo humano deben cumplir una serie de criterios sanitarios establecidos por la legislación en vigor, que se recoge en el Real Decreto 140/2003, de 7 de febrero, por el que se establecen los criterios sanitarios de la calidad del agua de consumo humano. Esta norma supuso en su día, la transposición al ordenamiento jurídico estatal de la Directiva 98/83/CE del

Consejo, de 3 de noviembre de 1998, relativa a la calidad de las aguas destinadas al consumo humano. Para determinar su cumplimiento, se dispone de 49 parámetros y sus correspondientes valores paramétricos divididos en 3 grandes grupos (Ministerio de Agricultura, 2022):

- 3 parámetros microbiológicos: entre los que está la medición de *Escherichia coli*, una bacteria que puede causar diarreas potencialmente mortales, siendo una de las causas principales de mortalidad en niños menores de 5 años en regiones de África Subsahariana y Asia del Sur.
- 27 parámetros químicos: se engloban aquí nitratos, diversos metales o trihalometanos entre otros algunos de los cuales pueden provocar molestias o generar trastornos en el organismo en función de la concentración.
- 19 parámetros indicadores: entre los que se encuentran pH, turbidez, conductividad, cloro, color, sabor y olor, etc. Siendo, por una parte, debido el color a la presencia de materia orgánica y minerales y sabor y olor, por otra, a sustancias químicas volátiles y a materia orgánica en descomposición.

Se presentan los 49 parámetros en una tabla inmediatamente debajo de estas líneas clasificados en los 3 grupos mencionados:

<i>Microbiológicos (3)</i>	<i>Químicos (27)</i>	<i>Indicadores (19)</i>
Escherichia coli	Parámetros químicos inorgánicos	Microbiológicos
Enterococo	Antimonio	Bacterias coliformes
Clostridium perf.	Arsénico	Recuento de colonias a 22 °C
	Boro	Caracteres organolépticos
	Cadmio	Color
	Cianuro	Olor y Sabor
	Cromo	Turbidez
	Fluoruro	Relacionados con la eficacia del tratamiento
	Mercurio	Aluminio
	Nitrato	Amonio
	Nitrito	Carbono Orgánicos Total
	Selenio	Cloro combinado residual
	Relacionados con los materiales	Cloro libre residual
	Cobre	Conductividad
	Níquel	Oxidabilidad
	Plomo	pH
	Parámetros químicos orgánicos	Índice de Langelier
	Benceno	Relacionados con la naturaleza del terreno
	Benzo(a)pireno	Cloruro
	1,2-dicloroetano	Hierro
	Hidrocarburos Policíclicos Aromáticos	Manganeso
	Microcistina	Sodio
	Tricloroetano + tetracloroetano	Sulfato
	Subproductos de la desinfección	
	Bromato	
	Trihalometanos	
	Plaguicidas	
	Total de Plaguicidas	
	Plaguicidas individuales	
	Otros según especificaciones del producto	
	Acilamida	
	Epiclorhidrina	
	Cloruro de vinilo	

Tabla 1: Parámetros de calidad del agua de consumo humano

Para evaluar la calidad de las aguas de consumo humano, se realizarán ensayos de estas propiedades físicas, químicas. Dichos ensayos requieren disponer de aceptación universal de tal manera que se posibilite comparar sus resultados con los estándares de calidad establecidos por la legislación.

2.1.3. Etapas principales en el funcionamiento de una ETAP

El proceso de tratamiento del agua para que esta llegue a ser apta para el consumo en una ETAP se compone habitualmente de las siguientes etapas:

- **Pretratamiento:** Una vez se obtiene el agua bruta captándola de cualquier fuente disponible, se hace pasar a través de un enrejado de diferentes

tamaños con el fin de eliminar las materias más grandes y visibles como pueden ser ramas u hojas. Seguidamente se lleva en caso necesario a un desarenador, el cual permite retirar una proporción considerable de las arenas presentes en un primer momento.

A continuación, es habitual realizar una primera dosificación de reactivos con diferentes finalidades (oxidantes, coagulantes, floculantes o estabilizadores del pH) según las características del agua bruta que se mezclan con la ayuda de un agitador.

- **Decantación:** seguidamente al pretratamiento y después de abandonar la cámara de mezcla, se guía el agua hacia los decantadores, unos equipos en los que las sustancias en suspensión se agregan formando flóculos que precipitan al fondo por su tamaño y peso, creando de esta manera un lecho de fangos que actúa como filtro del agua que abandona esta etapa ya clarificada.
- **Filtración:** si bien la decantación es capaz de eliminar una gran proporción de los sólidos en suspensión presentes en el agua, para asegurar una excelente calidad del agua de salida de la ETAP se utilizan una o varias etapas de filtros ya sean de arena, de carbón activo o similares que retienen las sustancias restantes. Estos equipos requieren de una frecuente limpieza a contracorriente mediante agua y aire por lo que se debe disponer de equipamiento auxiliar capaz de realizar dichas limpiezas.

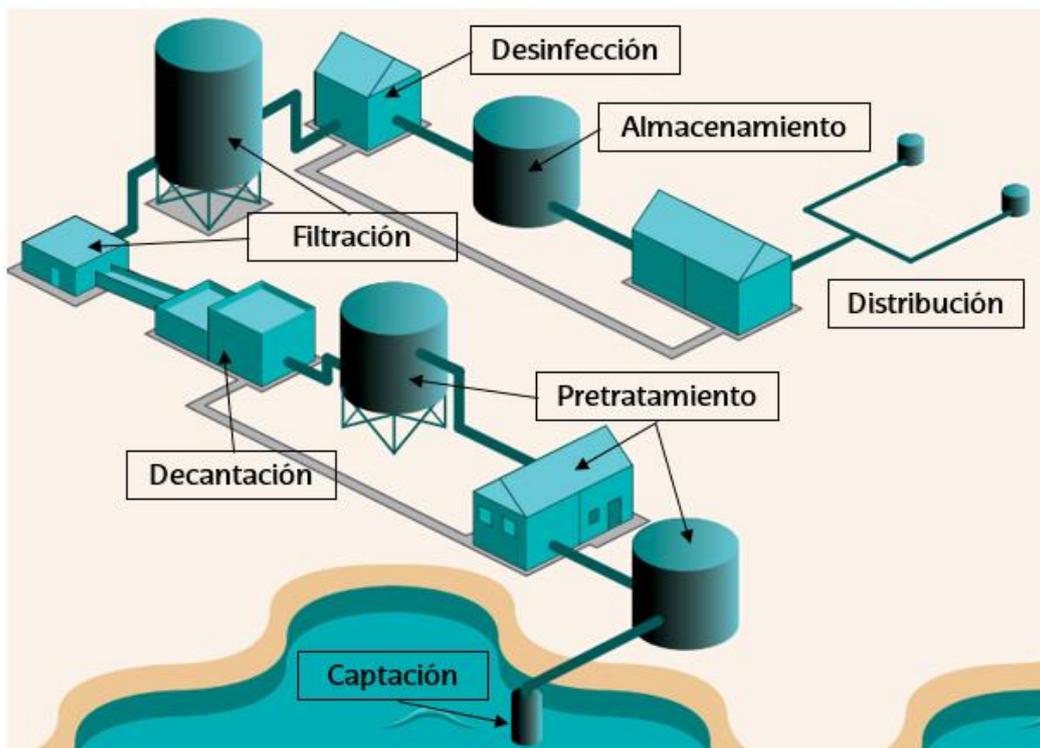


Ilustración 1: Etapas principales en el funcionamiento de una ETAP (Dip. Bad., 2022)

- **Desinfección:** se trata de la última de las etapas de una ETAP, en ella, se realiza una desinfección final con una o varias técnicas, ya sea mediante ozono, radiación ultravioleta o cloro, siendo la más habitual la cloración. Así mismo, hay lugares, entre los que está Bizkaia, en los que se añade flúor al agua como forma de prevención de la caries dental.
- **Almacenamiento:** una vez se ha completado el proceso de potabilización, se lleva el agua a uno o varios depósitos desde donde se realizará la distribución al consumidor final y que sirven de reservorio durante un periodo corto de tiempo.
- **Control final:** antes de realizar la distribución se realiza el control final sobre el agua potable producida en la planta ya sea a través de medición en continuo o ensayos de los diferentes parámetros que debe cumplir el agua para considerarse apta para el consumo humano.

La configuración final del proceso de tratamiento en una ETAP variará fundamentalmente según la calidad de agua de la que disponga en captación, siendo necesarios un mayor número de procesos y más intensos para una peor calidad del agua bruta.

2.2. Principios de la decantación

El objetivo principal de la decantación, también denominada clarificación, es la deposición de las partículas que se encuentran en suspensión en el agua, ya se trate de elementos ya presentes en el agua bruta o provenientes de la adición de reactivos durante el tratamiento.

La clarificación, en el contexto de la potabilización del agua, se refiere a la reducción de los sólidos en suspensión como fase previa a la filtración. Implica la eliminación parcial de los sólidos en suspensión hasta conseguir un agua de salida con una turbidez del orden de 1 a 4 NTU

Pueden distinguirse dos tipos de materias separables a través de la decantación:

- **Partículas granulares:** que sedimentan independientemente unas de otras, con una velocidad de caída constante
- **Partículas más o menos floculadas:** que resultan de una agregación natural o intencionada de las sustancias coloidales en suspensión.

La clarificación comprende un proceso con tres etapas: coagulación, floculación y sedimentación. En el primero de estos procesos se dosifica habitualmente un

coagulante, como el sulfato de alúmina, que se distribuye rápidamente gracias a la agitación de tal manera que se desestabilicen los sólidos en suspensión. La coagulación normalmente se produce en un equipo separado del decantador denominado mezclador o cámara de mezcla y situado aguas arriba del mismo.

En cuanto a la floculación, esta es asistida por una ligera agitación que resulta en la agregación de partículas de mayor tamaño denominadas flóculos tal y como es preferible.

En algunas situaciones la dosificación de un ayudante de la coagulación, como puede ser el polielectrolito aniónico, mejora el rendimiento de la floculación, además de dosificar una menor cantidad de coagulante (Trent, 1978).

Seguidamente se produce el proceso de la sedimentación, que es la separación por gravedad de sólidos suspendidos en el agua. La mayor parte de los flóculos más grandes son atrapados en este proceso de sedimentación, que en un decantador vertical como el de la planta piloto, atrapa las partículas cuya velocidad de sedimentación es superior a la velocidad ascensional del fluido.

Después de dosificar coagulante en el agua bruta, esta fluye a través de la zona de reacción para promover la agregación de flóculos y seguidamente pasa a la zona de sedimentación. El agua clarificada decanta por los vertederos de la parte superior mientras que los flóculos sedimentan y caen al fondo del decantador. Una vez decantada, el agua limpia es llevada hacia la siguiente etapa, la filtración. Por otro lado, una parte de los flóculos sedimentados son devueltos a la zona de reacción por acción de la turbina y son reutilizados.

Para mantener el balance de masa en el interior del decantador es necesario extraer periódicamente parte de esos fangos mediante la apertura de una válvula de extracción de fangos que se encuentra en el fondo del equipo. Generalmente, el tiempo de retención hidráulico de los decantadores puede variar entre 1 y 4 horas.

Respecto a la dosificación de reactivos, es posible determinar la dosis mediante la realización de Jar test. Sin embargo, la selección de la velocidad de rotación de la turbina y la extracción de fangos quedan a criterio de la experiencia previa del operador del equipo. (Degrémont, 1979)

2.3. Descripción de la Planta Piloto de Etxebarri

Este apartado versará sobre la localización de la planta, la ubicación del decantador en la propia instalación, una descripción de la línea de tratamiento y componentes principales de los que dispone y una explicación del funcionamiento del decantador.

2.3.1. Localización de la Planta Piloto de Etxebarri

La Planta Piloto está ubicada en la margen izquierda del último de los sinuosos meandros que describe el río Nervión, justo antes de llegar a Bilbao y convertirse en ría al comenzar la influencia de las mareas, en una parcela adyacente al curso fluvial del Polígono Industrial Lezama-Leguizamón, en el término municipal de Etxebarri, Bizkaia. A su vez, la explanada en la que se ubica la planta yace en la parte superior del Tanque de tormentas de Etxebarri, junto a la cual está localizada la Instalación de bombeo y turbinado de Bolueta.



Ilustración 2: Ubicación de la planta piloto de Etxebarri

Esta planta piloto fue diseñada con un concepto modular, por lo que es desmontable y transportable en caso de que el CABB decida su traslado a otra ubicación en donde continuar los estudios.

Por ello, la planta está compuesta de seis módulos tamaño contenedor conteniendo las diferentes etapas del proceso. Cada uno cuenta con su propia estructura metálica, se conectan entre sí de forma sencilla y todos los equipos de

la planta piloto se han diseñado apoyados sobre la estructura de cada módulo de forma que se puedan transportar en su conjunto.

El equipo con mayor relevancia para este proyecto es el decantador circular de recirculación de fangos tipo Accelator, situado en el módulo N° 2, descrito con amplio grado de detalle unos párrafos más adelante.

Además, dispone de cinco casetas prefabricadas adicionales del mismo tamaño que los demás módulos en donde se encuentran el resto de las instalaciones auxiliares requeridas para completar la planta, como son la dosificación de reactivos, equipos de instrumentación y control, un pequeño taller, almacén, sala de reuniones y una oficina/laboratorio.



Ilustración 3: Vista panorámica de la planta piloto, en la parte izquierda de la fotografía y su entorno

2.3.2. Línea de tratamiento de la Planta Piloto

La línea de tratamiento de agua de la planta piloto requerida para potabilizar aguas del río Nervión y que simula la 2ª Fase de la ETAP de Venta Alta cuenta con los siguientes procesos (CABB, 2014):

- **Captación de agua bruta:** cuenta con dos bombas sumergibles instaladas dentro de una cámara de aspiración metálica prefabricada y montada en el interior del canal de la obra de toma de la Instalación de bombeo y turbinado de Bolueta. Además, recientemente se ha instalado una bomba

adicional en la parte superior de la obra de toma utilizada en el periodo de tiempo en que se está turbinando agua proveniente del Zadorra (derivada desde la ETAP de Venta Alta) en la instalación de Bombeo y Turbinado de Bolueta.

- Preoxidación: posibilidad de dosificación de ozono, peróxido de hidrógeno, permanganato potásico, dióxido de cloro y cloro gas. Siendo estas dos últimas las empleadas en la 2ª Fase de Venta Alta actualmente y las dos primeras lo serán próximamente.
- Coagulación: se cuenta con las mismas que están disponibles en la 2ª Fase de la ETAP de Venta Alta, sulfato de alúmina y policloruro de aluminio.
- Ajuste de pH: a través de dosificación de hidróxido de sodio.



Ilustración 4: Vista general de la Planta Piloto de Etxebarri

- Floculación: el floculante, almidón o cloruro de polidialildimetilamonio denominado polidadmac (éste disponible en Venta Alta) junto con coadyuvantes, carbón activo en polvo o permanganato potásico, se dosifica antes de la entrada al decantador. Adicionalmente, existe la posibilidad de dosificar cloro gas o dióxido de cloro por segunda vez como oxidantes.
- Decantación: este proceso ocurre en el interior del Decantador circular de manera conjunta con el proceso anterior de floculación.
- Filtración en arena: se dispone de 2 filtros de arena abiertos en configuración 1+1R, siendo utilizada la unidad en reserva durante la operación de lavado del otro filtro. El equipo se ha diseñado con la

capacidad de simular la carrera de filtración de la 2ª Fase de Venta Alta, así como diferentes tipos de lavado.

- Depósito de agua filtrada y lavado de filtros y bombeo a etapa de oxidación/oxidación avanzada: el agua es almacenada en el tanque de agua filtrada y de lavado una vez atraviesa los filtros de arena. Las bombas de agua lavado y la impulsión al siguiente proceso de tratamiento aspiran desde este depósito. El tanque tiene una capacidad de 6.000 L. Las bombas y soplantes de lavado son compartidas para filtros de arena y de carbón activo

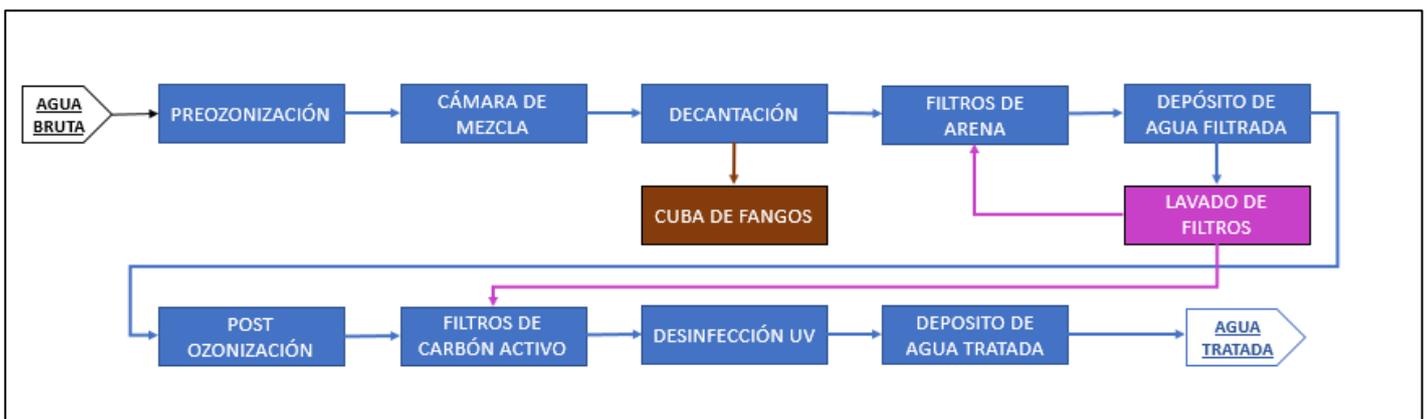


Ilustración 5: Diagrama de proceso de tratamiento de la planta piloto de Etxebarri

- Ajuste de pH: de nuevo a través de dosificación de hidróxido de sodio.
- Oxidación/Oxidación avanzada: Una vez se ha completado el pretratamiento físico-químico, se ha incluido una etapa de oxidación avanzada mediante cámaras de ozonización, equipo de UV y dosificación de peróxido de hidrógeno con la intención de estudiar su implantación en la 2ª Fase de la ETAP de Venta Alta. La instalación de esta etapa se encuentra ya en fase de licitación pública de cara a comenzar la ejecución de las obras requeridas en la segunda mitad del año 2022.
- Filtración con Carbón Activo: se dispone de 2 filtros en configuración 1+1R en donde tiene lugar la fase de afino mediante filtros de carbón activo de tipo abiertos. La unidad de reserva se utiliza mientras tiene lugar la operación de lavado de la que se encuentre en servicio. El equipo se ha diseñado con la capacidad de simular la carrera de filtración, distintos lechos y boquillas, así como diferentes tipos de lavado presentes en la 2ª Fase de Venta Alta.
- Depósito de agua tratada: tanque con capacidad de 1.000 L en donde se almacena el agua proveniente de los filtros. Además, el grupo de servicios

de la planta piloto aspira agua desde este depósito.

- Desinfección final con cloro gas.
- Depósito final de agua tratada: con tiempo de retención hidráulico de 24h instalado con posterioridad al resto de la planta, para analizar THMs y la presencia de la bacteria *C. perfringens*. Cuenta con 250 L de capacidad.

2.3.3. Decantador circular

El decantador se encuentra instalado en el módulo N°2 de la planta piloto que comparte con otros equipos como una cámara de mezcla rápida para coagulación, un mezclador estático para oxidación/floculación y un depósito para tomar muestras de fango obtenido de las purgas del propio decantador. En este módulo tiene lugar el proceso de coagulación / floculación y decantación

En cuanto a las características del equipo en donde se realiza la etapa de decantación-floculación, se trata de un decantador circular de recirculación de fangos modelo Accentrifloc, similar en su funcionamiento y concepción al modelo Accelator de Dégreumont. Está construido en polipropileno hidrófobo y tiene un diámetro de 2,2 metros y una altura de 2,65 metros. En su parte superior está instalada una estructura metálica de tipo tramex donde está instalado el motor que acciona la turbina y desde donde se manipulan las varillas que desplazan el bandaje regulable. (CABB, 2014)



Ilustración 6: Plano 3D del decantador de la planta piloto de Etxebarri

La forma del equipo es cilíndrica, con fondo troncocónico con 45 grados de inclinación. Este tipo de decantadores (tipo Accelerator) cuentan con una estructura interna en forma de campana, soportada mediante ocho refuerzos en su parte inferior, que separa la zona en donde se produce la agitación y recirculación gracias al giro de la turbina, de una zona más tranquila donde se produce la separación por gravedad del agua y los fangos.

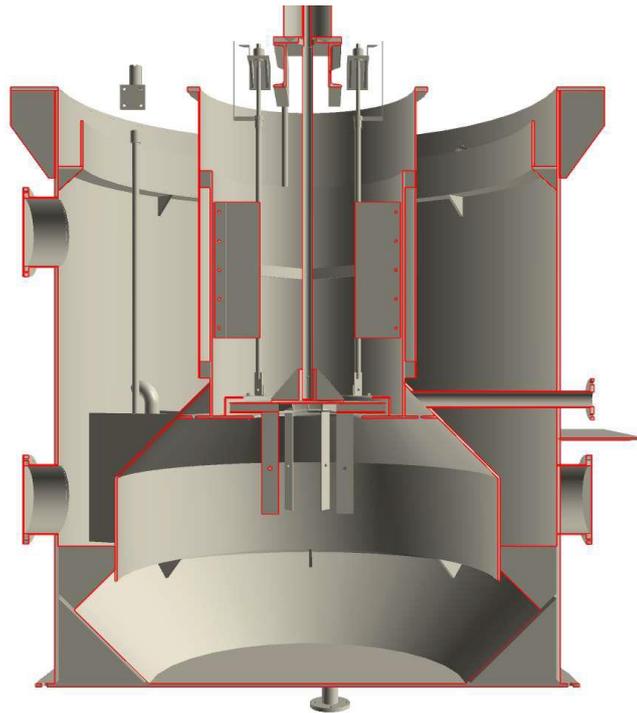


Ilustración 7: Sección vertical del decantador de la planta piloto de Etxebarri

La campana está rodeada de una camisa cilíndrica en la mitad superior, que permite el paso del fluido desde la parte interna del decantador hacia la parte externa. En el interior de la campana también se encuentran adosadas cuatro placas deflectoras con sus correspondientes tirantes de soporte instalados con el fin de evitar la creación de un vórtice debido al giro de la turbina transformando la velocidad tangencial en normal.

Así mismo, en la parte central del decantador y en el interior de la campana, se inserta una turbina movida a través de un motor eléctrico colocado, como se ha mencionado, en la parte superior del equipo. Alrededor de la zona de descarga de la turbina va situado un bandaje regulable que permite aumentar o reducir esta zona y de esta forma variar el caudal de recirculación y la agitación.

En cuanto al diseño de la turbina, tiene dos partes diferenciadas. Por un lado, la parte inferior cuenta con álabes largos y planos, permite la mezcla del agua bruta y productos químicos entrantes con los fangos que están siendo recirculados. Por otro, la parte superior, actúa como un impulsor. Se muestra en la siguiente imagen un corte de la zona donde se sitúa la turbina que permite distinguir los 12 álabes que componen la parte que actúa como impulsora.

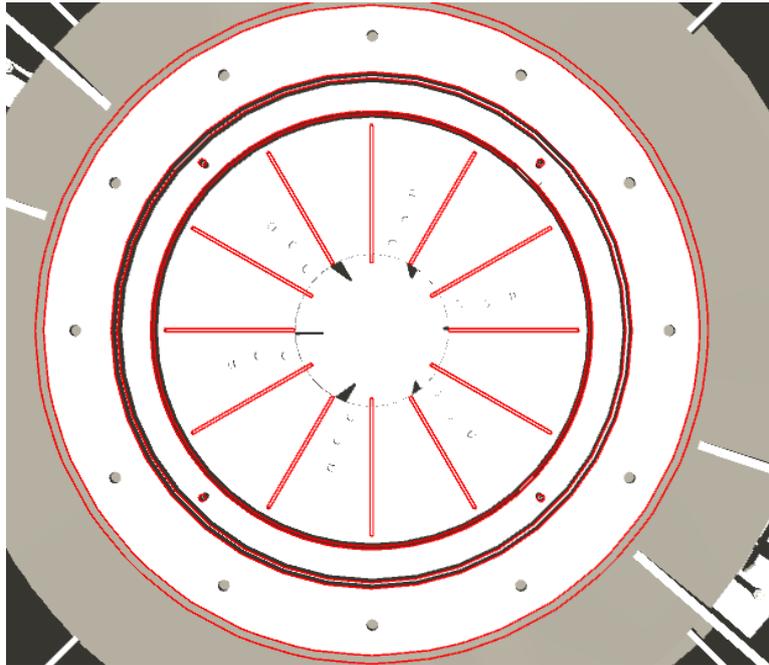


Ilustración 8: Detalle de sección horizontal del decantador por la zona de la turbina

La entrada de agua bruta se produce a través de una tubería de $\varnothing 65$ mm (sombreada en azul en la ilustración 8) en la zona media del decantador que se inserta en una cámara troncocónica independiente, denominada cámara tórica o de reparto, en el interior de la campana y que distribuye el fluido entrante a través de 12 orificios de $\varnothing 20$ mm hacia la cámara central.

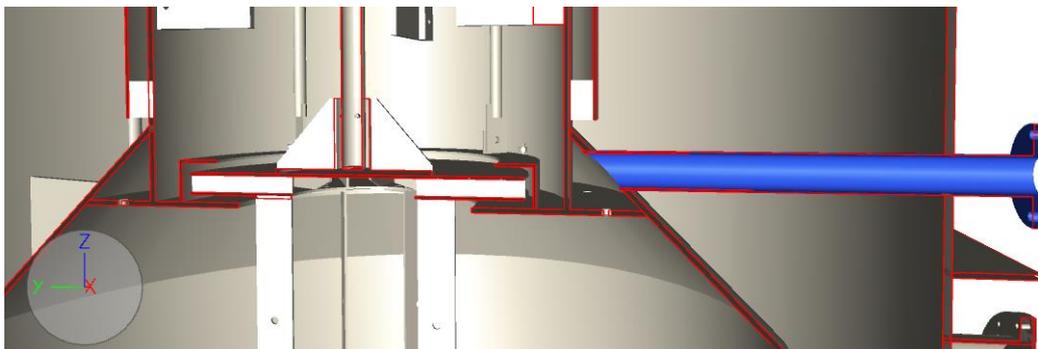


Ilustración 9: Detalle de sección vertical por zona de turbina.

La salida de agua del decantador se produce gracias a un vertedero situado en todo el perímetro externo de la parte superior, desde donde se dirige a la tubería de salida del mismo diámetro que la de entrada. En esta zona también se ubica otra tubería de rebose de agua utilizada únicamente en caso de mal funcionamiento del equipo y para eludir así su desbordamiento.

Para evitar la acumulación en exceso de fangos en el decantador, y con la finalidad de extraerlos, existen dos compartimentos sectoriales situados a ambos lados de la campana y diametralmente opuestos, denominados concentradores de fangos, desde donde son extraídos mediante una válvula de purga de fangos temporizada para cada uno de los compartimentos.

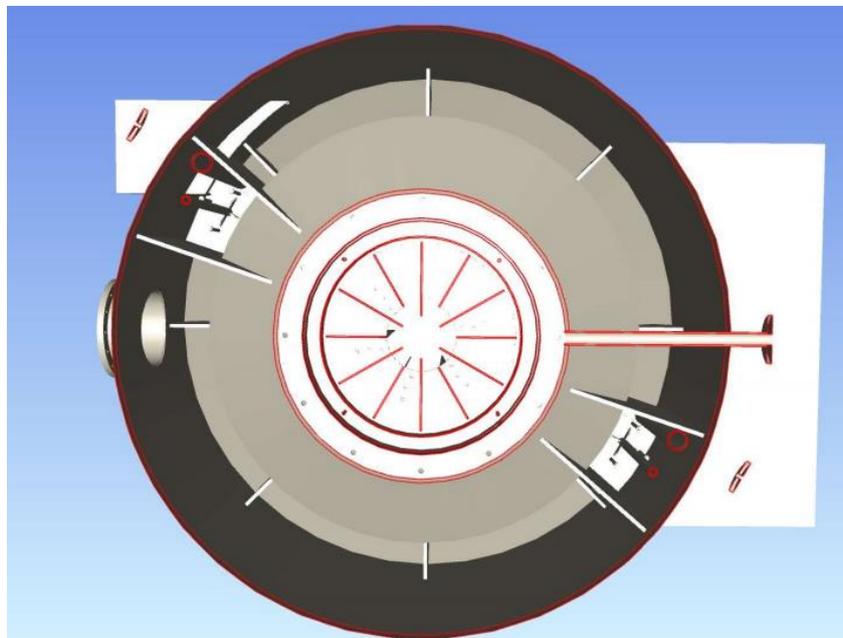


Ilustración 10: Corte horizontal del decantador de la planta piloto de Etxebarri

Adicionalmente, posee una válvula de purga en el fondo del decantador de apertura manual instalada a fin de evacuar el exceso de lodos. Cuenta también con dos mirillas en el lateral opuesto a la entrada de agua realizadas en metacrilato por donde se puede apreciar el interior.

2.3.4. Funcionamiento del decantador

El funcionamiento del decantador es el siguiente: el agua bruta llega al equipo una vez abandona la cámara de mezcla a través de una tubería que atraviesa las paredes externas del decantador para llegar hasta la cámara tórica o cámara de

reparto, cuya forma es la de un triángulo rectángulo revolucionado respecto a un eje externo.

Esta cámara dispone de 12 perforaciones en su parte inferior desde donde se infunde a la zona central (en el interior de la campana). Es en esta zona central donde el floculo es agitado mediante una turbina e impulsado hacia la parte superior. Desde ahí pasa por el espacio existente entre la campana y la camisa cilíndrica que la rodea y sale a la zona de decantación periférica pasa a la cámara de decantación periférica, que como se ha mencionado previamente es una zona más tranquila donde las bajas velocidades del fluido permiten la separación por gravedad de las partículas más grandes.

Los flóculos se deslizan por la parte externa e inclinada de la campana y caen por gravedad mientras que el agua "limpia" acaba decantando por la parte superior, donde es recogida en un canal común perimetral provisto de un vertedero desde donde se conduce a la siguiente etapa de la planta, los filtros de arena.



Ilustración 11: Parte superior del decantador de la Planta piloto de Etxebarri en su funcionamiento ordinario

En cuanto a los fangos acumulados en los concentradores, estos se recogen mediante una tubería con dimensión suficiente para poder retirarlos homogéneamente. La purga de los fangos se realiza mediante un sistema de electroválvulas temporizadas que conducen los fangos a un depósito exterior con capacidad de 100 L.

2.4. Industria 4.0

Dado que este proyecto se encuentra englobado dentro de la progresiva transformación digital de los procesos productivos, denominada Cuarta Revolución Industrial o Industria 4.0, que viene ocurriendo en la segunda década del siglo XXI, se ha considerado relevante incluir un apartado a modo de pinceladas a grandes rasgos de lo que constituye esta nueva etapa de la industrialización.

La Industria 4.0 está basada en la implantación de diversas tecnologías (denominadas tecnologías clave) en los procesos productivos con el fin de transformar estos procesos y alcanzar una mayor eficiencia en la cadena de producción que lleve aparejada una mejora de la competitividad.

Esta denominación de Industria 4.0 nació en Alemania, si bien, viene utilizándose de manera generalizada en el continente europeo junto a otros términos relacionados como Fábrica Inteligente, Internet de las cosas,

El término está referido a un modelo de organización y control de la cadena de valor novedoso desplegado a lo largo de todo el proceso productivo, en el cual se incorporan las nuevas tecnologías de la información, de la informática y el software de las que se dispone en la actualidad.

2.4.1. Tecnologías clave

Las tecnologías clave que se incorporan a los procesos también llamados Pilares de la Industria 4.0 son los siguientes (Coddii, 2022):

- Comunicaciones móviles: es la base del Internet de las cosas, más conocido por sus siglas en inglés IoT (Internet of things). Se posibilita de esta forma y en tiempo real la obtención de datos, la coordinación de los sistemas de producción y los servicios remotos.
- Cloud Computing: también llamado la Nube. Permite el flujo de datos desde cualquier lugar eliminando la necesidad de invertir en infraestructuras de almacenamiento y procesamiento de datos.

- **Big data (Análisis de datos):** se corresponde con el análisis de grandes cantidades de información generada por los equipos conectados, extrayendo valor de los mismos, generando modelos predictivos u otros informes estadísticos que permitan su aprovechamiento.
- **Impresión 3D:** referida a la fabricación aditiva de objetos a partir de modelos virtuales.
- **Robótica:** nuevos sensores junto al grado de avance de la inteligencia artificial actual han posibilitado la creación de robots que disponen de una mayor flexibilidad, autonomía y cooperatividad.

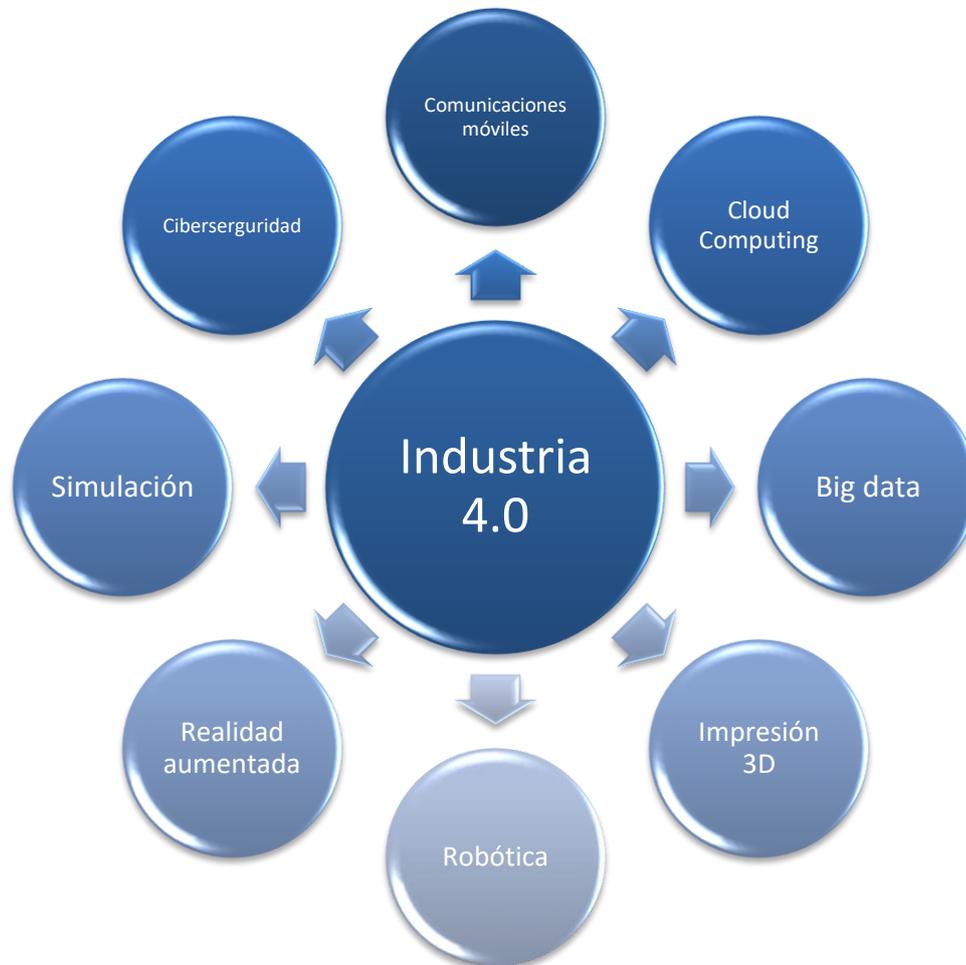


Ilustración 12: Tecnologías clave de la Industria 4.0

- **Realidad aumentada y virtual:** permite mostrar información digital sobre elementos reales, de manera que se puede recibir más información sobre los elementos del entorno. Aquí es donde se circunscribe la modelización BIM, cada vez más presente en la Industria y particularmente en el mundo

del Agua, en donde habitualmente es requisito en licitaciones públicas relacionadas.

- **Simulación:** un mayor número de empresas apuestan por la implantación y uso de gemelos digitales de sus fábricas, plantas o procesos productivos. Se trata de réplicas virtuales de un proceso productivo o una parte del mismo, una línea de producción, una fábrica, una planta... que permiten testar el comportamiento de estos procesos o probar cambios que lleven a aumentar la productividad, mejorar los equipos o diseñar nuevos productos. En esta tecnología en donde se enmarca esta investigación de simulación mediante CFD.
- **Ciberseguridad:** el aumento de sensores y equipos conectados que permiten una mejora de la productividad conlleva a su vez posibles puertas de entrada para ataques informáticos y malware, por lo que es esencial tener en cuenta todos los equipos en el planteamiento de ciberseguridad de las empresas.

En cuanto al rol desempeñado por la industria 4.0, esta trata de actuar ante cualquier cambio de la demanda en tiempo real, para ello se debe llevar a cabo una agilización del proceso productivo a la vez que se optimiza la gestión de los recursos.

2.5. La Agenda 2030: los objetivos de desarrollo sostenible (ODS) y sus metas.

“La Agenda 2030 y el Desarrollo Sostenible es un plan de acción aprobado por la Asamblea General de las Naciones Unidas el 27 de septiembre de 2015 mediante la resolución 70/1, con la finalidad de transformar nuestro mundo. Se trata de un plan en favor de las personas, el planeta y la prosperidad. Este plan será implementado por todos los países mediante una alianza de colaboración”. (Asamblea General de las Naciones Unidas, 2015)

“La Agenda 2030 propone 17 objetivos y 169 metas. Los ODS tratan de frenar los problemas de la sociedad y el cambio climático a nivel mundial. Tiene en cuenta también, que algunos de los problemas más importantes a resolver son la contaminación, el crecimiento de los desastres naturales, la pérdida de diversidad biológica, la pobreza, el hambre, la vivienda, etc. Estas preocupaciones mundiales se agruparon en 17 ODS, y cada uno de ellos, incluye varias metas detalladas para alcanzarlos.” (Sustentable, 2022)

Este proyecto que se presenta en este documento se puede asociar principalmente a dos de los 17 objetivos establecidos en la Agenda 2030, el ODS 6: Agua limpia y saneamiento y el ODS 9: Industria, innovación e infraestructura.



Garantizar la disponibilidad de agua y su ordenación sostenible y el saneamiento para todos.



Construir infraestructura resiliente, promover la industrialización inclusiva y sostenible y fomentar la innovación.

“El ODS 6 pretende lograr un acceso universal y equitativo al agua potable y a servicios de saneamiento e higiene adecuados, así como mejorar la calidad del agua a nivel global

Por su parte, el ODS 9 pretende conseguir infraestructuras sostenibles, resilientes y de calidad para todos, impulsar una nueva industria bajo criterios de sostenibilidad que adopte tecnologías y procesos industriales limpios y ambientalmente racionales, fomentar la tecnología, la innovación y la investigación, y lograr el acceso igualitario a la información y al conocimiento, principalmente a través de Internet.” (Red Española Pacto Mundial, 2022)

“Las empresas tienen un papel importante que jugar en la consecución de las metas de ambos objetivos, fomentando procesos industriales que no impacten sobre el medio ambiente, incorporando a las pequeñas y medianas empresas como socios comerciales dentro de su cadena de valor, favoreciendo la expansión de infraestructuras sostenibles y resilientes y de tecnologías de la comunicación y apoyando la innovación y la investigación en su núcleo de negocio. Nos encontramos en la Cuarta Revolución Industrial o Industria 4.0, caracterizada por automatización, la digitalización y por una gama de nuevas tecnologías dirigidas hacia la optimización de procesos y recursos mediante la recolección y el aprovechamiento de los datos. El proceso de transformación solo beneficiará a quienes sean capaces de innovar y adaptarse”. (Red Española Pacto Mundial, 2022)

Seguidamente, se exponen ciertas acciones en una tabla que pueden llevar a cabo las empresas para garantizar agua limpia y su saneamiento y construir infraestructuras resilientes y sostenibles, promover la industrialización inclusiva y sostenible y fomentar la innovación. Se indica el impacto positivo que tendría en la organización la realización de las mismas y los indicadores de seguimiento en la consecución de los objetivos y las metas. Elaboración propia basada en (Herrera Rodríguez, 2018)

ACCIÓN	IMPACTO EN LA EMPRESA	INDICADORES
<p>Trazar alianzas con organizaciones o centros educativos para realizar proyectos que ayuden a alcanzar este objetivo.</p> <p>DESARROLLO: Cooperar con centros educativos y otras organizaciones a la hora de realizar talleres de educación ambiental que informen sobre correctos hábitos para el uso racional del agua en la vida cotidiana y en las empresas.</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Mejora la imagen de la empresa. • Establece alianzas con otras organizaciones 	<ul style="list-style-type: none"> • Número de organizaciones con las que colabora. • Número de proyectos realizados.
<p>Apoyar a ONGs, centros educativos o asociaciones que trabajan en promover el crecimiento sostenible en países en desarrollo.</p> <p>DESARROLLO: Colaborar con centros educativos para concienciar de la importancia de los avances tecnológicos, la investigación e innovación científica. Facilitar el acceso a las TIC en los países en desarrollo y realizar proyectos de cooperación dirigidos a desarrollar infraestructuras sostenibles en comunidades desfavorecidas. Colaborar con los programas universitarios que tengan como objeto de estudio la investigación y la innovación, proporcionando formación a estudiantes de doctorado.</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Establece alianzas. • Mejora la imagen de la empresa. 	<ul style="list-style-type: none"> • Número de organizaciones con las que colabora. • Número de acciones apoyadas. • Impacto directo e indirecto de las acciones. • Número de personas alcanzadas.
<p>Invertir en I+D+i ODS.</p> <p>DESARROLLO: Invertir en Investigación, Desarrollo e Innovación para fomentar el desarrollo de infraestructuras sostenibles que</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Reducción de costes. • Mayor rapidez en los procesos. 	<ul style="list-style-type: none"> • Inversión económica realizada en I+D+i.

<p>reduzcan el impacto ambiental y con capacidad de prevención y corrección de las posibles consecuencias que desencadenan los fenómenos extremos.</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Mejora la imagen de la empresa. 	
--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	-------------------------------------------------------------------------------------	--

Tabla 2: Acciones para llevar a cabo los objetivos ODS, impacto en la empresa y sus indicadores.

3. OBJETIVOS

El funcionamiento interno de los decantadores, así como los procesos de separación por gravedad que en ellos ocurren son a menudo poco conocidos y basan su diseño en diversas relaciones empíricas y en experiencia que han ido acumulando las empresas desarrolladoras de este tipo de equipos. Con el fin de llegar a conocer su funcionamiento en profundidad puede llevarse a cabo una simulación CFD.

El propósito general de este proyecto se establece en conocer qué es lo que ocurre en el interior del decantador de la planta piloto y tratar de reproducir el comportamiento hidráulico, estudiando los sentidos de flujo, recirculaciones, posibles puntos muertos y cortocircuitos, considerando un funcionamiento ordinario del equipo y valiéndonos para ello de una simulación realizada mediante software CFD.

Además de esto, se plantea analizar los resultados obtenidos en cuanto a flujos, campos de velocidades y recirculaciones teniendo en cuenta las diferentes configuraciones de altura del bandaje regulable del decantador.

4. ALCANCE

El planteamiento de este proyecto se hace en 2 frentes: etapas y modelos 3D.

- Etapas en las que se irán añadiendo sucesivamente nuevos procesos ocurrentes en el interior del decantador de la Planta Piloto de Etxebarri (CATABB):



Ilustración 13: Etapas del diseño del modelo 3D del decantador de la Planta Piloto de Etxebarri

- o La investigación que se presenta en este documento constituye la primera etapa (se muestra sombreada en la figura en color azul más oscuro) de lo que se podría llegar a simular mediante el uso de software CFD. Consiste en simular el funcionamiento interno del decantador circular de la planta considerando una única fase, es decir, teniendo en cuenta solo el agua y añadiendo el efecto del giro de la turbina.

- Si bien en un primer momento se planteó un estudio más amplio (simulación del comportamiento del agua y de los fangos en el interior del equipo, incorporación de modelos para floculación y sedimentación y procesos químicos), el tiempo requerido para estudiar la primera de las etapas ha sobrepasado las expectativas para un Trabajo de estas características, por lo que las siguientes etapas se perfilan como un punto de partida para líneas de investigación futuras.
- **Modelos 3D:** Se han confeccionado tres modelos en los cuales se va aumentando progresivamente el grado de detalle de los elementos del interior del decantador y, además, para nueve diferentes posiciones o alturas del bandaje regulable de la turbina.



Ilustración 14: Modelos 3D realizados, con la geometría simulada en azul oscuro.

Debido al tiempo de cálculo requerido para la realización de una simulación con cada una de las geometrías se ha decidido simular el comportamiento del decantador utilizando los nueve modelos 3D de complejidad media, tratando, así, de alcanzar un equilibrio entre grado de detalle del modelo 3D y el tiempo de cálculo, el cual aumenta según crece el nivel de detalle de los modelos.

5. ESTADO DEL ARTE

Este capítulo se encuentra estructurado en dos apartados, en el primero de ellos se exponen las diferentes tipologías de decantadores existentes en el mercado.

En el caso del segundo apartado, se va a realizar un repaso histórico hasta la actualidad de las investigaciones y estudios publicados más relevantes y relacionadas con la mecánica de fluidos computacional y concretamente con los equipos denominados decantadores.

Con el fin de materializar este apartado sobre el estado del arte, se han consultado las bases bibliográficas, referentes a la potabilización y a la decantación, de las que se dispone en la Escuela de Ingeniería de Bilbao, tanto online como en versión física. Además, a través de la página web de la Biblioteca de la Universidad del País Vasco, se puede acceder al catálogo Worldcat, que cuenta con publicaciones de bibliotecas de universidades públicas y privadas a nivel mundial.

Por su parte, la consulta de artículos científicos, otros trabajos de fin de máster, tesis, revistas y otros documentos se ha realizado a través de buscadores, repositorios institucionales y bases de datos de editoriales académicas.

5.1. Tipos de decantadores

A continuación, se presentan los tipos de decantadores: estáticos y de contacto de fangos. (Degrémont, 1979)

5.1.1. Decantadores estáticos

A estos aparatos, por costumbre, se les califica de 'estáticos', pero la decantación se realiza mediante un procedimiento dinámico. Pueden estar constituidos por un depósito rectangular o circular.

Para que se produzca la deposición de fangos, se precisa una velocidad ascensional de agua inferior a la de caída de las partículas. Esta velocidad de caída es dependiente de las características de las mismas, densidad y tamaño. Además, los decantadores estáticos pueden equiparse o no con un sistema de rascado de fangos, dependiendo de las características del agua y del aparato.

Los decantadores de pequeño tamaño, cuentan con inclinaciones de 45 a 60° en los fondos con el fin de evacuar los fangos por la parte inferior, ya sea de manera continua o discreta.

En el caso de grandes decantadores, estas pendientes llevaría a construirlas en alturas excesivas por lo que la inclinación del fondo de estos equipos se reduce al mínimo requerido. Los fangos se extraen mediante unas rasquetas hasta depositarlos en una fosa desde donde se evacúan al exterior.

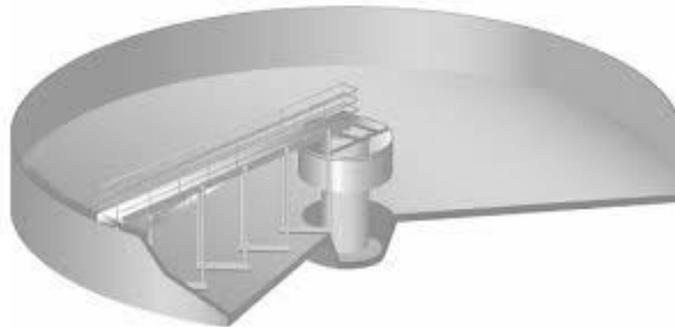


Ilustración 15: Decantador estático de rasquetas

En el caso de fangos procedentes de la decantación primaria del tratamiento de aguas residuales urbanas, las pendientes deben ser mayores que en el caso de aguas potables, lo que hace más imperiosa la necesidad de utilizar decantadores de rasquetas.

Este tipo de decantadores deben funcionar de forma regular debido a que las variaciones de caudal generan remolinos que arrastran los fangos hacia la superficie.

5.1.2. Decantadores por contacto de fangos

Este tipo de decantadores, creados con la mejora de las técnicas de floculación, permite acelerar en gran medida el proceso de decantación y obtener un rendimiento óptimo de los reactivos utilizados. Para ello se basan en elevar la concentración de los flóculos o en la recirculación de los fangos. Unas cámaras especialmente diseñadas llamadas concentradores garantizan el espesamiento del exceso de fangos y permite su extracción automáticamente.

A su vez, la utilización de decantadores por contacto de fangos permite reducir la superficie requerida en su construcción hasta una décima parte (en el mejor de los casos) de lo que sería necesario en caso de utilizar decantadores estáticos.

Cuando se cuenta con un elevado volumen de fangos, es habitual incorporar rasquetas al decantador.

Existen dos subtipos de decantadores por contacto de fangos: de recirculación de fangos y de lecho de fangos.

5.1.2.1. Decantadores de recirculación de fangos

Cuentan con una zona de reacción y una de decantación. Los fangos se recogen en la base de la decantación y se envían de nuevo a la zona de reacción.

Los fangos se separan del agua clara en una zona de decantación, tras lo que se recirculan pasando a una zona de mezcla con un sistema de agitación mecánica o hidráulico. El agua bruta con los reactivos, se introduce en esta zona de mezcla.

Es posible añadir módulos laminares que se colocan en la zona de decantación, los cuales producen una sedimentación acelerada.

Los decantadores tipo Accelator como el que se encuentra instalado en la Planta piloto de Etxebarri o los de la 2ª Fase de la ETAP de Venta Alta están clasificados en este subtipo de equipos de clarificación.

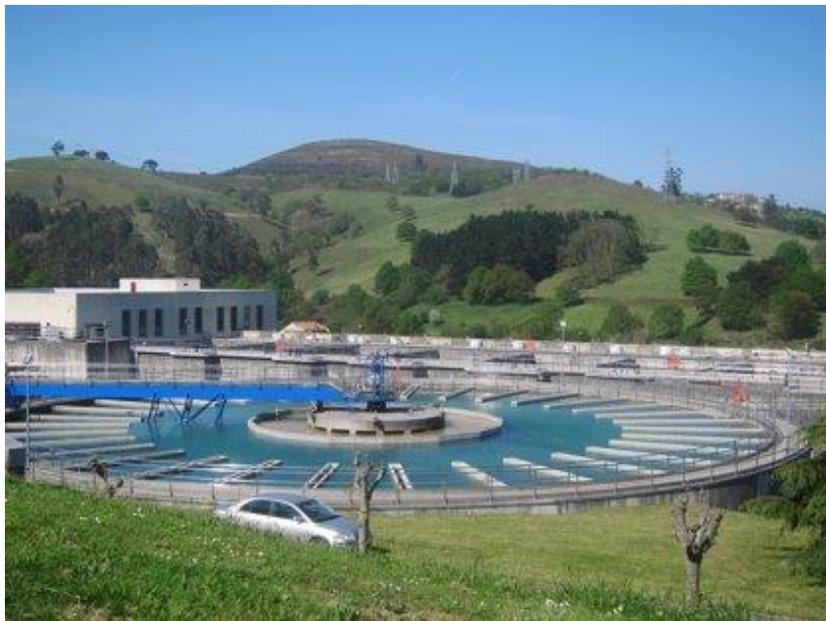


Ilustración 16: Decantador tipo Accelator de la 2ª Fase de la ETAP de Venta Alta

5.1.2.2. Decantadores de lecho de fangos

Mantienen el fango sin circular, en una masa en expansión. En el punto de introducción del agua a tratar la agitación es muy lenta.

Los módulos se colocan en la zona de decantación o en el propio lecho de fangos, teniendo una doble función aumentando la eficacia del lecho de fangos y produciendo torbellinos estacionarios.

Son decantadores de lecho de fangos los equipos tipo Pulsator, los cuales producen un manto de fangos con una concentración de partículas muy elevada. Estos decantadores tipo Pulsator son muy comunes en Estaciones de Tratamiento de Agua Potable, en donde se suelen acompañar de módulos lamelares para aumentar de forma espectacular su rendimiento en el mínimo espacio posible.

5.2. Estudios relacionados

En este apartado se va a hacer un repaso histórico hasta la actualidad de las investigaciones y estudios publicados más relevantes y relacionadas con la mecánica de fluidos computacional y concretamente con los decantadores.

La más antigua de las bases teóricas aplicada en el diseño de decantadores se trata del concepto de tanque de sedimentación ideal concebido por (Hazen, 1904) y desarrollado posteriormente por (Camp, 1946). Introdujo el concepto de ratio de desbordamiento superficial, basado en la suposición de flujo uniforme horizontal. También teorizó que el tiempo de retención hidráulico de estos equipos debiera de ser igual o mayor que el tiempo de sedimentación de las partículas, asumiendo que todas ellas lleven las mismas velocidades horizontales.

Casi un siglo más tarde, la investigación de (Wahlberg, 1998) graficó las curvas de rendimiento de eliminación de los sólidos en suspensión frente al ratio de desbordamiento superficial y concluyó que no puede demostrarse una relación causal entre ambos.

En otro orden de investigaciones, la de (Tchobanoglous, 2003) describía afectaciones al rendimiento del decantador por corrientes generadas por la inercia del flujo de entrada de agua, por la zona superior en la interfase entre el agua y el aire y por corrientes de densidad causadas por la diferencia de

temperaturas entre el fluido entrante al decantador y el que ya está presente en su interior. Esto puede dar lugar a generar cortocircuitos de diversa extensión.

A la hora de diseñar un decantador, las decisiones en cuanto a configuración, profundidad, disposición de entrada y salida, mecanismos de recogida y extracción de fangos se tomarán con el fin de maximizar la floculación, controlar la actividad biológica y minimizar las posibilidades de fenómenos hidráulicos no deseados como pueden ser corrientes de remolinos y de densidades (Water Environment Federation, 2005)

Así mismo, con argumentos similares a los dos previos, en manuales de operación de decantadores tipo Accelator se determinan como factores influyentes en la eficacia de estos equipos los siguientes (Degrémont):

- Calidad del agua: Variaciones en la concentración del influente o variaciones térmicas influyen en gran medida en el funcionamiento de los decantadores debido a que producen cambios en la densidad del fluido. Esto origina corrientes que pueden llegar a generar cortocircuitos hidráulicos, es decir, agua bruta que pasa directamente de la entrada de agua hacia la salida del equipo.
- Distribución uniforme del flujo en la zona de entrada: las diferencias de velocidad del fluido generan turbulencias que pueden extenderse por el interior del equipo.
- Acción del viento: debido a que normalmente se trata de equipos descubiertos, están sometidos a las inclemencias meteorológicas, siendo la más relevante el viento.
- Flujo laminar y estable en la zona de sedimentación: requerimiento de número de Reynolds muy bajo y número de Froude más elevado.
- Salida uniforme: a través de los vertederos del equipo que evite la succión.

Por otro lado, la investigación de (Emad Imam, 1983) simuló numéricamente un decantador y determinó que la presencia de sólidos no afecta al patrón de flujo sino únicamente a la turbulencia de la mezcla. Su trabajo nos sirve de base para simular el decantador en una única fase, es decir, considerando únicamente el agua para comprobar los sentidos de flujos y zonas muertas en caso de existir.

Además, (Stamou, 1989) en su estudio de simulación numérica del flujo y sedimentación de un decantador primario rectangular, afirma que la influencia

de la fase sólida puede ignorarse en el caso de que en el decantador se dé una baja concentración de sólidos en suspensión (menor de 150-200 mg/L)

Por su parte, (Fateme Rostami, 2010) realizó una simulación CFD de un decantador primario rectangular para su tesis en la que analiza patrones de flujo, campos de velocidades, líneas de corriente y energía turbulenta. Utiliza un modelo de turbulencia $k-\epsilon$ de bajo número de Reynolds y tiene en cuenta solo el agua en el interior del decantador.

En otro artículo (K. Samaras, 2010) muestran los resultados de su investigación de simulación CFD de un decantador circular de una ETAP en Tesalónica para conocer su hidrodinámica. Realiza la simulación utilizando solamente agua y con el modelo de turbulencia $k-\epsilon$.

(STEPHENS, 2009) realizaron una modelización CFD del proceso de flotación junto con el de sedimentación en decantadores secundarios de Estaciones de depuración de aguas residuales, teniendo en cuenta en el mismo modelo la fracción sólida del fluido en el interior del equipo.

Así mismo, se han consultado otros muchos trabajos que llevan a cabo simulaciones CFD en decantadores ya sea primarios o secundarios, situados en estaciones de tratamiento de aguas potables (ETAPs), estaciones de depuración de aguas residuales (EDARs) o estaciones de depuración de aguas residuales industriales (EDARIs), de los que se citan los siguientes: (Zhang, 2017) (Gkesouli, 2015), (S. Lainé, 1999), (Ahern, 2017), (Ansar Ali, 2020) o (Knolmar, 2020).

6. EN QUÉ CONSISTE EL CFD

En este apartado se va a introducir el CFD, en qué consiste, su filosofía de uso, impacto actual de esta tecnología, visión general de un código de CFD, bases teóricas y software utilizado en el presente proyecto.

6.1. ¿Qué es el CFD?

La mecánica de Fluidos computacional o por sus siglas en inglés CFD (Computational Fluid Dynamics) es una disciplina basada en la representación gráfica virtual de fenómenos reales obtenidos a partir de algoritmos y modelos matemáticos.

Se trata de una herramienta inicialmente desarrollada por físicos que aprovecha la capacidad de los ordenadores de realizar los millones de cálculos requeridos para resolver las ecuaciones matemáticas que gobiernan el comportamiento de los fluidos.

En la actualidad se dispone de software específicamente diseñado, basado en estos códigos, algoritmos y modelos matemáticos que permiten predecir y simular una gran variedad de fenómenos físico-químicos, desde flujos de fluidos o sólidos, transferencias de masa, transferencias de calor, reacciones químicas

6.2. Filosofía de uso

A diferencia de los análisis experimentales que son comúnmente llevados a cabo en un laboratorio y donde las mediciones se limitan a un pequeño número de puntos, una simulación CFD ofrece la ventaja de brindar una visión general del campo de flujo con información exhaustiva de las diferentes propiedades del fluido.

Una interpretación cualitativa de los campos de velocidades y de presión es generalmente la primera etapa en el diseño o la mejora de un equipo preexistente. Estudiar cualitativamente un equipo sienta las bases para comprender su funcionamiento en profundidad, una comprensión que puede llegar a suscitar nuevas ideas que pueden a su vez conducir a la mejora significativa de los productos y los procesos.

Además de la visión general, y, por tanto, cualitativa del campo de flujo, la simulación mediante software CFD permite obtener estimaciones cuantitativas precisas de propiedades del campo de flujo como pueden ser la velocidad, presión o temperatura entre otras. También ofrece la posibilidad de simular

diferentes condiciones físicas para un mismo modelo para probar el comportamiento del modelo virtual ante cambios en ciertas variables.

Por otro lado, los estudios cuantitativos, constituyen la base para la optimización y el control, que puede, de la misma forma, llegar a mejorar de manera considerable los productos y procesos, generalmente a través de una serie de pequeñas etapas intermedias.

Adicionalmente, se puede dar lugar a una importante reducción de costes desde el punto de vista del diseño, desarrollo de productos y testado, ya que realizar simulaciones es generalmente más económico que los experimentos y pruebas físicas.

Sin embargo, no todo son ventajas, entre los aspectos críticos de las simulaciones CFD se pueden encontrar principalmente errores que pueden ocurrir utilizando modelos de flujo simplificados, fallos en condiciones de contorno o errores de interpolación. Además, el tiempo de cálculo puede ser particularmente largo para geometrías grandes y complejas.

6.3. Impacto actual de esta tecnología

Las simulaciones CFD están haciéndose paso a paso presentes en un amplio rango de industrias y campos de la ingeniería, desde la eólica, solar, fabricación, metalúrgica, marina, aeronáutica, aeroespacial, petroquímica, biomédica, del ciclo integral del agua, diseño industrial, del automóvil, química, civil, nuclear e incluso en el deporte de alto nivel.

En los últimos tiempos, los códigos CFD han tenido una rápida e importante evolución en cuanto a técnicas y modelos matemáticos. A esto se puede añadir la disposición de una amplia gama de programas CFD integrales de la mano de una disminución de los costes de los equipos de hardware y mejoras en tecnología y electrónica permiten una mayor facilidad de uso y un menor coste a la hora de realizar simulaciones CFD.

En este apartado se quiere mostrar algunos ejemplos reales de aplicación de la tecnología CFD:

- Diseño mediante simulación CFD del barco del equipo de vela de la Copa América INEOS TEAM UK (Britannia, 2022):

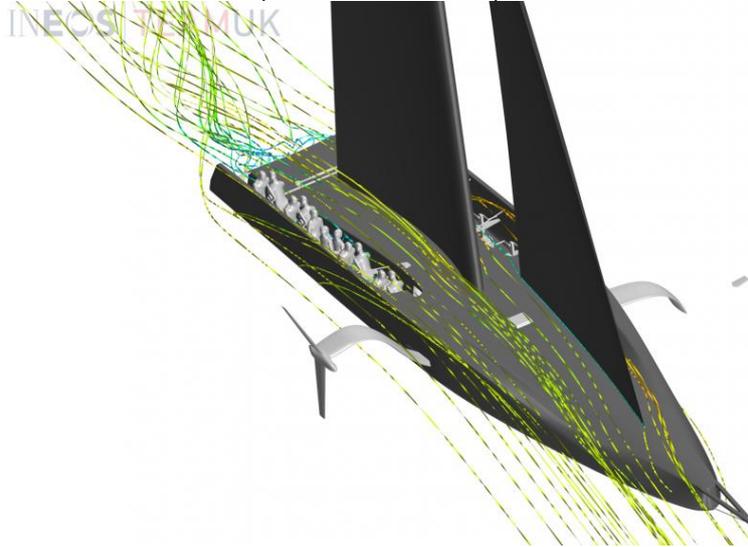


Ilustración 17: Diseño mediante simulación CFD del barco del equipo de vela de la Copa América INEOS TEAM UK

- Desarrollo de traje de baño para natación de alto nivel asistido mediante simulación CFD. Su ventaja fue tal, que el 90 % de las medallas correspondientes a disciplinas acuáticas de velocidad en las Olimpiadas de Pekín 2008 fueron ganadas por nadadores que vestían este bañador (ANSYS, 2012).

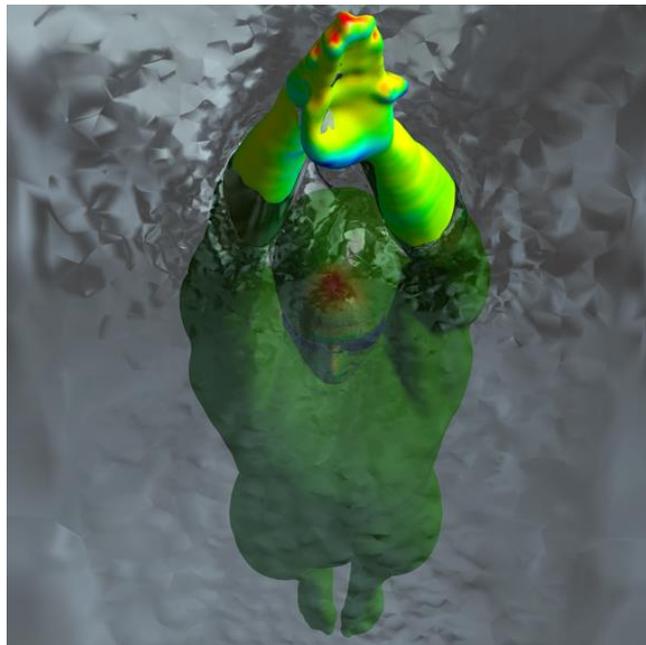


Ilustración 18: Simulación CFD de un traje de baño para natación de alto nivel asistido

- Validación clínica de la hemodinámica de la aorta utilizando software CFD desde angiografía por tomografía computerizada (Zhu, 2018):

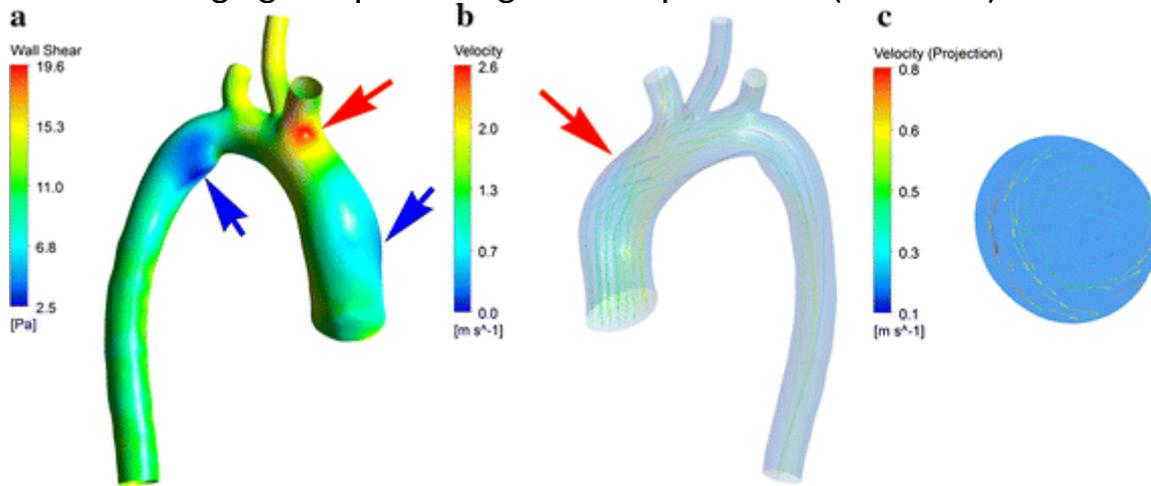


Ilustración 19: Validación clínica de la hemodinámica de la aorta mediante CFD

- Prueba aerodinámica CFD de un aerogenerador de 5 MW de potencia y 126 m de diámetro de rotor (TECH, 2022):

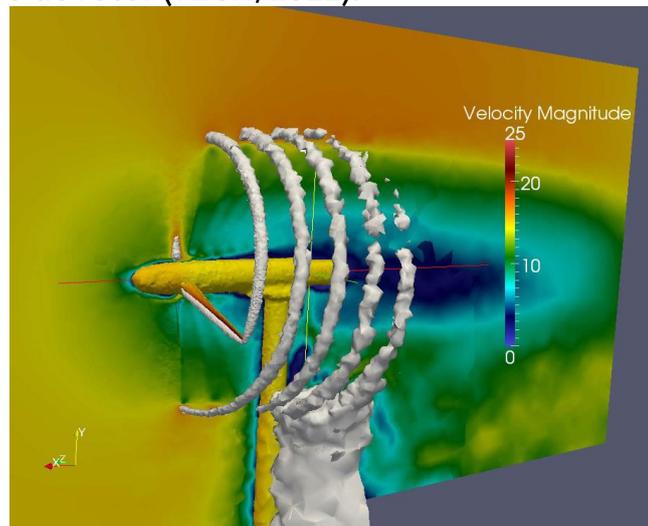


Ilustración 20: Simulación CFD aerogenerador

Como apunte final, no cabe duda de que en las décadas venideras los CFD estarán presentes en muchos más ámbitos de nuestra vida. Aprovechando los avances en computación y de la mejora de las interfaces de usuario de los programas se proporcionará una mayor facilidad de uso y manejo del software CFD.

6.4. Visión general de un código de CFD

A la hora de utilizar un software de CFD de forma óptima, se deben seguir estas etapas:

1. Definición de la geometría: en primer lugar, se debe de concretar la geometría a utilizar, que será la que se le proporcione al software de CFD para ejecutar las siguientes etapas. Existe la opción de partir de un modelo ya existente y modificarlo a través de software especializado tipo 3D CAD o también puede ser creado desde cero, ya sea utilizando planos o realizando un escaneado 3D del interior del equipo.
En el caso de los CFD, lo que se pretende simular es el comportamiento de un fluido, de tal manera que la geometría deberá de corresponderse con la del fluido ocupando el espacio o equipo a modelar. Por así decirlo, se utiliza el negativo o la geometría inversa del equipo en el que se encuentra el fluido, no el propio equipo en sí. A modo de ejemplo, en el caso del decantador, lo que se debe modelar el agua del interior del equipo, no las paredes del decantador.
2. Discretización del modelo: también denominado mallado o *meshing* en inglés. Una vez se obtiene la geometría del equipo, se pasa a realizar la discretización del modelo 3D, es decir, dividirlo en muchísimos elementos pequeños que llamamos celdas. Es en estas celdas donde posteriormente se resuelven los modelos matemáticos para conocer cómo se comporta el fluido en su interior. Las celdas pueden tener forma piramidal, cúbica, dodecaédrica o poliédrica, según el método utilizado. Esta división se puede realizar a través del propio software CFD.
La cantidad de celdas aumenta según la complejidad del modelo, la calidad de los resultados, y la potencia y características del equipo informático utilizado. Una simulación básica puede contener menos de 1 millón de celdas mientras que una muy avanzada puede llegar a los cientos de millones. Además de esto, se ha de tener en cuenta que cuanto más denso (por pequeño) sea el mallado, mejores son los resultados. Sin embargo, también se requerirá un tiempo de computación mayor.
3. Descripción de los fenómenos físicos: a continuación de dividir la geometría inicial en muchísimas celdas, se pasa a describir los fenómenos físicos puestos en juego a través de la selección de los modelos matemáticos de resolución adecuados y que estén disponibles en el software. Estos conjuntos de ecuaciones se resolverán digitalmente de manera iterativa en cada una de las celdas de la malla.

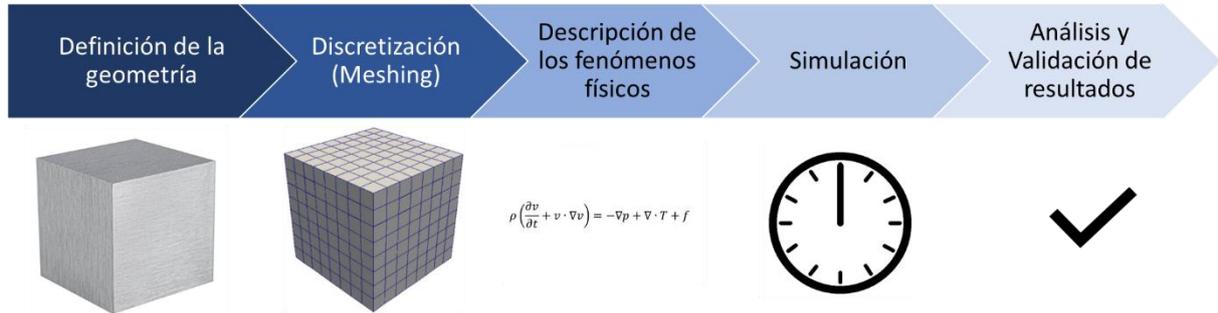


Ilustración 21: Etapas en la modelización CFD de un proceso

4. **Simulación:** después de seleccionar los modelos de resolución adecuados se realiza la simulación propiamente dicha, es decir, se ejecuta el código del software CFD. El tiempo de resolución puede variar de pocos minutos a semanas o meses de continuos cálculos para conseguir la convergencia de las ecuaciones y una solución realista. La forma de reducir el tiempo de resolución se basa en ejecutar el código en paralelo a través de varios procesadores a la vez o en reducir el tamaño de las celdas del mallado (lo cual lleva a peor calidad de los resultados).
5. **Análisis de resultados:** por último, se pasa a realizar un análisis de los resultados obtenidos. Con el fin de validar la simulación, estos resultados se comparan con las medidas observadas en ensayos o con los resultados teóricos esperados. También se pueden considerar como válidos, resultados sin variaciones significativas obtenidos en sucesivas ejecuciones en las cuales se utiliza un mallado progresivamente más fino, esto se denomina independencia del mallado.

6.5. Bases teóricas del CFD

La mayor parte de los modelos físicos implementados en los códigos CFD se derivan de las leyes fundamentales que gobiernan el flujo de los fluidos que son (Bandrés, 2021-2022):

- Conservación de la masa
- Conservación del momento lineal
- Conservación del momento angular
- Ecuaciones de Navier-Stokes

En este apartado se presentan dichas leyes fundamentales en su forma diferencial descritas para un volumen de control infinitesimal. Posteriormente, la forma real de implementar estas leyes en los códigos de CFD es desarrollándolas mediante métodos numéricos de resolución.

Se presentan a continuación las bases teóricas de los códigos CFD (Siemens, 2019):

6.5.1. Conservación de la masa:

El balance de masa en volumen de control a través de su superficie es igual al ritmo de decrecimiento de la masa dentro del volumen de control. Su expresión se llama ecuación de la continuidad:

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

Donde:

ρ es la densidad, es decir la masa por unidad de volumen

\mathbf{v} es la velocidad

6.5.2. Conservación de la cantidad de movimiento

También se denomina conservación del momento lineal por influencia del inglés. Está basada en la segunda ley de Newton: $F=ma$

La velocidad de cambio de la cantidad de movimiento es igual a la fuerza resultante actuante sobre el elemento. Su expresión es la siguiente:

$$\frac{\partial (\rho \mathbf{v})}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{v} \otimes \mathbf{v}) = \nabla \cdot \boldsymbol{\sigma} + \mathbf{f}_b$$

Donde:

ρ es la densidad, es decir la masa por unidad de volumen

\mathbf{v} es la velocidad

\mathbf{f}_b es la resultante de las fuerzas actuantes sobre el volumen de control

$\boldsymbol{\sigma}$ es el tensor de esfuerzos o de tensiones de Cauchy

Descomponiendo esta ecuación en las componentes x, y, z se llega a las denominadas ecuaciones de Cauchy.

Componente x:

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho u U) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} + \rho f_x$$

Componente y:

$$\frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho v U) = -\frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial z} + \rho f_y$$

Componente z:

$$\frac{\partial(\rho w)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho w U) = -\frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zz}}{\partial z} + \rho f_z$$

Ecuaciones de Cauchy (Bandrés, 2021-2022)

6.5.3. Conservación del momento angular

Para que se cumpla la ley de la conservación del momento angular, se requiere que el tensor de esfuerzos visto en el apartado anterior sea simétrico. Lo que algebraicamente queda de la siguiente manera:

$$\sigma = \sigma^T$$

6.5.4. Ecuaciones de Navier-Stokes

Las ecuaciones de Navier-Stokes son una serie de ecuaciones en derivadas parciales que describen el flujo de un fluido viscoso. Se derivan de las ecuaciones de Cauchy presentadas anteriormente expresando el tensor en función de la viscosidad, el gradiente de velocidad del fluido y asumiendo una viscosidad constante. Expresando esto algebraicamente, las ecuaciones de Navier-Stokes resultan:

Componente x:

$$\begin{aligned}
 & \frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u^2)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho uv)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho uw)}{\partial z} = \\
 & -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \nabla \cdot \mathbf{U} + 2\mu \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left[\mu \left(\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[\mu \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right) \right] + \rho f_x
 \end{aligned}$$

Componente y:

$$\begin{aligned}
 & \frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho uv)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v^2)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho vw)}{\partial z} = \\
 & -\frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x} \left[\mu \left(\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda \nabla \cdot \mathbf{U} + 2\mu \frac{\partial v}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left[\mu \left(\frac{\partial w}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial z} \right) \right] + \rho f_y
 \end{aligned}$$

Componente z:

$$\begin{aligned}
 & \frac{\partial(\rho w)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho uw)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho vw)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w^2)}{\partial z} = \\
 & -\frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial x} \left[\mu \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\mu \left(\frac{\partial w}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial z} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda \nabla \cdot \mathbf{U} + 2\mu \frac{\partial w}{\partial z} \right) + \rho f_z
 \end{aligned}$$

Siendo,

$$\tau_{xx} = \lambda (\nabla \cdot \mathbf{U}) + 2\mu \frac{\partial u}{\partial x}; \tau_{xy} = \tau_{yx} = \mu \left(\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right)$$

$$\lambda = -\frac{2}{3}\mu$$

Ecuaciones de Navier-Stokes (Bandrés, 2021-2022)

Como se ha comentado previamente, la forma en la cual los códigos CFD resuelven las leyes fundamentales es a través de métodos numéricos, entre los que se encuentra el método de los volúmenes finitos o FVM (por su nombre en inglés), transformando los modelos matemáticos en un sistema de ecuaciones algebraicas. Una transformación que requiere de la discretización de las ecuaciones fundamentales en el espacio y tiempo.

6.6. Software CFD elegido

En el caso del software que se ha utilizado en la ejecución de este proyecto, se consideraron dos alternativas:

- Open FOAM: se trata de un software de código abierto y gratuito, que tiene como ventaja la propia gratuidad de las licencias y como desventajas, la inexistencia de interfaz de usuario gráfica y una curva de aprendizaje larga.
- Siemens Simcenter Star CCM+: se trata de un software propietario desarrollado por la empresa alemana Siemens. Permite modelar y analizar una amplia variedad de problemas de ingeniería concernientes al campo de la mecánica de fluidos. Como ventajas tiene la existencia de una interfaz de usuario gráfica y el conocimiento previo del software por parte del autor del presente proyecto ya que en la Escuela de Ingeniería de Bilbao se imparte en una asignatura llamada Mecánica de Fluidos Computacional.

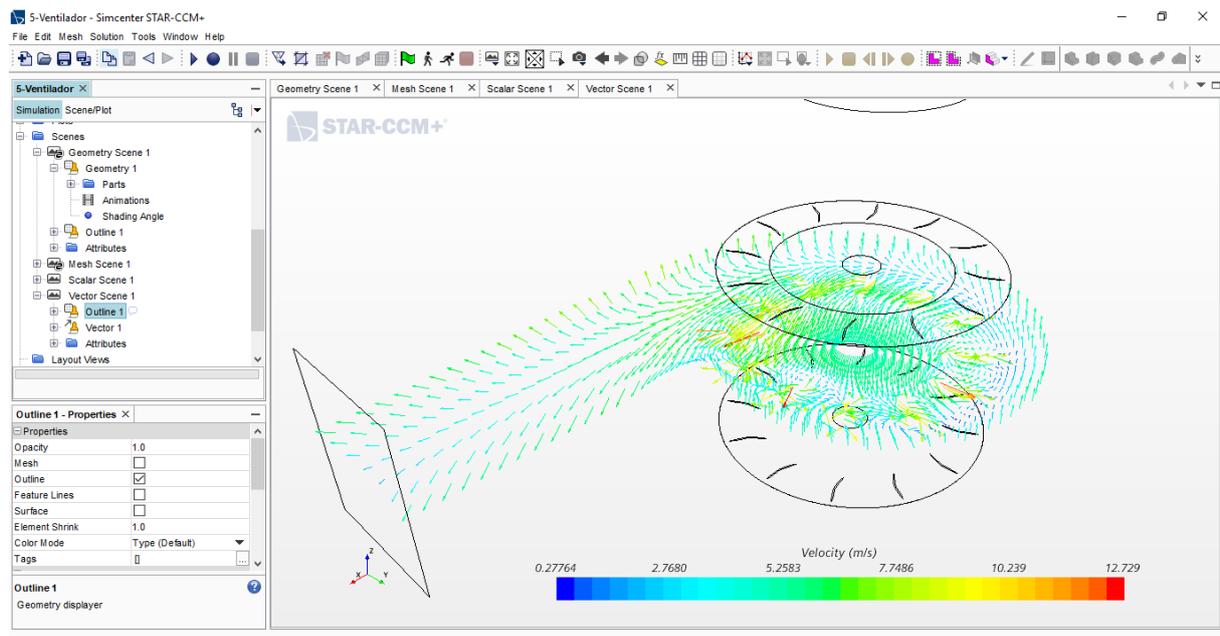


Ilustración 22: Simulación de un ventilador industrial en el software Star CCM+

Teniendo en cuenta los condicionantes mencionados, se ha elegido el software de Siemens Simcenter Star CCM+.

7. GEOMETRÍA

7.1. Consideraciones previas

Tal y como se ha expuesto en el apartado anterior de Visión general de un software de CFD, la primera etapa que se debe llevar a cabo es la definición de la geometría.

En un primer momento, y dado que existen modelos 3D de la planta piloto de Etxebarri al completo, se planteó la posibilidad de extraer la geometría que se necesita para realizar la simulación CFD, con el fin de eludir el engorroso trabajo que supone el modelado de una geometría 3D compleja tal y como es el caso del decantador de la planta. Para ello se requirió la colaboración del departamento de delineación de la empresa STS (antigua Dégremont) en donde el autor de este proyecto realizó su prácticum.

Se dieron indicaciones de la geometría que se trataba de obtener y un posible modo de consecución, esto es, a partir del archivo 3D, extraer un negativo del decantador, es decir, el volumen interior del decantador correspondiente con el fluido. Para ello, se sugirió partir de un volumen cilíndrico macizo de diámetro el del propio decantador y realizar una operación booleana de resta con el modelo del equipo, quedando, en principio, de esta forma la geometría "inversa" a la de las «paredes» del decantador, es decir, el volumen que ocuparía el agua en el interior del decantador.

Una semana después se recibió comunicación en la que se indicaba que habían logrado realizar las operaciones sugeridas y que procedían a compartir el modelo 3D en un archivo en formato .iges (un formato compatible con el software que se va a utilizar, el Siemens Simcenter Star CCM+).

 C4Q-030-EQ-004-IMPLANTACION EQUIPOS MODULO 2_LLENADO.iges 07/02/2022 13:43 Archivo IGES 18.650 KB

Ilustración 23: Geometría preparada por el departamento de delineación de la empresa

Finalmente, se realizó la importación al software de CFD, pero se obtuvieron diversos mensajes de error y cuelgues en el programa al tratar de trabajar con este modelo. Además, la geometría aparecía dividida en miles de partes tal y como se muestra parcialmente en la imagen de abajo y no se logró llegar a visualizar ninguna parte del modelo en pantalla. Se trató de hacer reparaciones en el modelo, con el fin de poder utilizarlo, pero se obtienen mensajes de error adicionales.

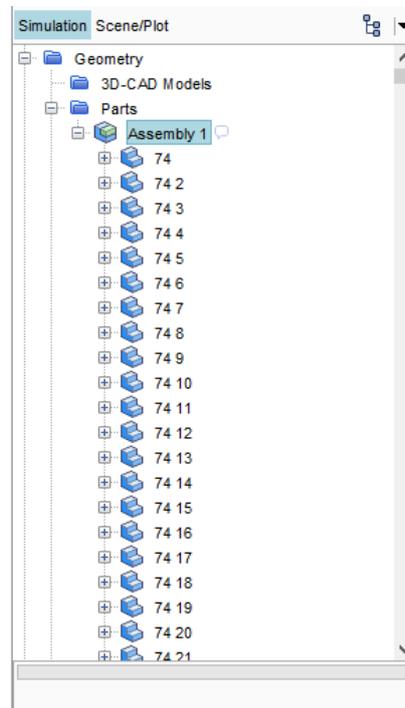


Ilustración 24: Errores de importación de la geometría 3D

Vistos los problemas asociados a la importación de esta geometría, se decidió desecharla (manteniendo el archivo para el caso de que se encuentre un método que permita su utilización, ya que se considera como la más detallada, al contener todos los elementos presentes en el decantador) y se pasó a realizar los modelos 3D desde cero aprovechando las capacidades que ofrece el modelizador integrado en el propio software Simcenter STAR-CCM+, denominado 3D-CAD.

En primer lugar, se han de definir las dimensiones principales de los elementos interiores que componen el decantador. Para ello se cuenta con planos conjunto y detalles del decantador del proyecto de obras ejecutadas de la planta piloto y con un archivo tipo Navisworks para navegar en 3D.

La principal limitación de los planos es que las medidas que aparecen son de las paredes del decantador, mientras que a la hora de realizar la modelización se necesitan medidas de los «huecos interiores», es decir, de la parte que ocupa el agua. Debido a esto, es necesario realizar operaciones en la mayoría de los casos para obtener las dimensiones requeridas. Adicionalmente, hay partes del decantador, como la turbina y su eje, el bandaje móvil de la turbina y las conducciones de entrada, salida y rebose, que no se encuentran en estos planos o no se define su posición con claridad.

Como consecuencia de lo comentado en el párrafo anterior, la gran mayoría de las dimensiones de los detalles del interior del decantador se han obtenido del archivo en formato Navisworks de la planta, utilizando una herramienta que ofrece el software, denominada «medida».

En segundo lugar, para generar geometrías utilizando el mencionado software 3D-CAD, se parte de un boceto o «sketch» dibujado por el usuario en 2D y se extruye en una dirección seleccionada o se revoluciona alrededor de un eje determinado. La geometría final se obtendrá combinando diferentes extrusiones, figuras de revolución y vaciados.

Para llegar a dibujar cada uno de los «sketches» es necesario conocer la posición de cada uno de los vértices en caso de delinear polígonos, o los centros y radios en caso de circunferencias, en coordenadas cartesianas, en relación con el origen de coordenadas. Como origen de coordenadas se ha elegido el punto central del fondo del decantador, en donde se encuentra una conducción por la que se realiza la extracción de fangos del fondo del equipo.

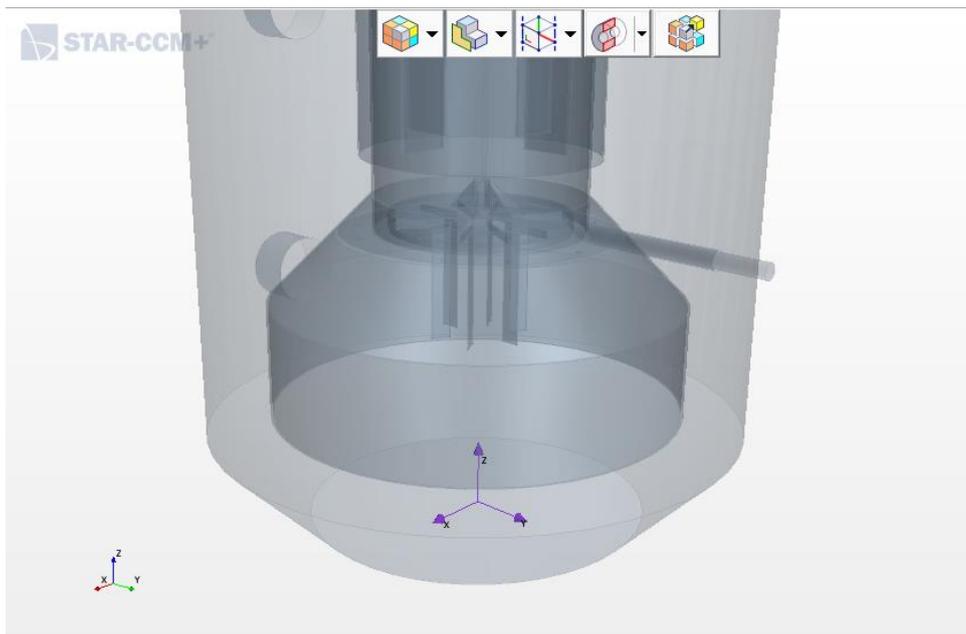


Ilustración 25: Posición del origen de las coordenadas, situada en el centro del fondo del decantador

Se puede apreciar en la imagen inferior el proceso de dibujado de un «sketch», con forma de L girada 90° en el sentido horario, correspondiente a la estructura del bandaje que envuelve el agitador en el interior del decantador.

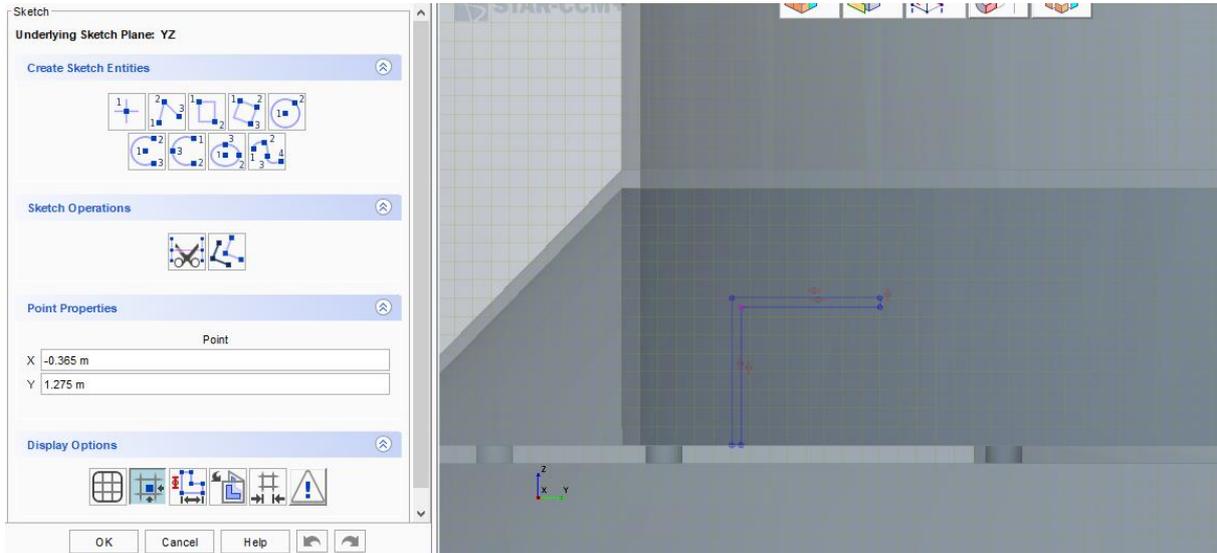


Ilustración 26: Creación del sketch del bandaje regulable en el software Star CCM+

A continuación, se muestra el proceso de revolución de este mismo sketch alrededor del eje que pasa de arriba abajo por el centro del decantador, la estructura final (bandaje) sombreado en amarillo acaba teniendo forma de tapón de botella con un agujero en su parte central.

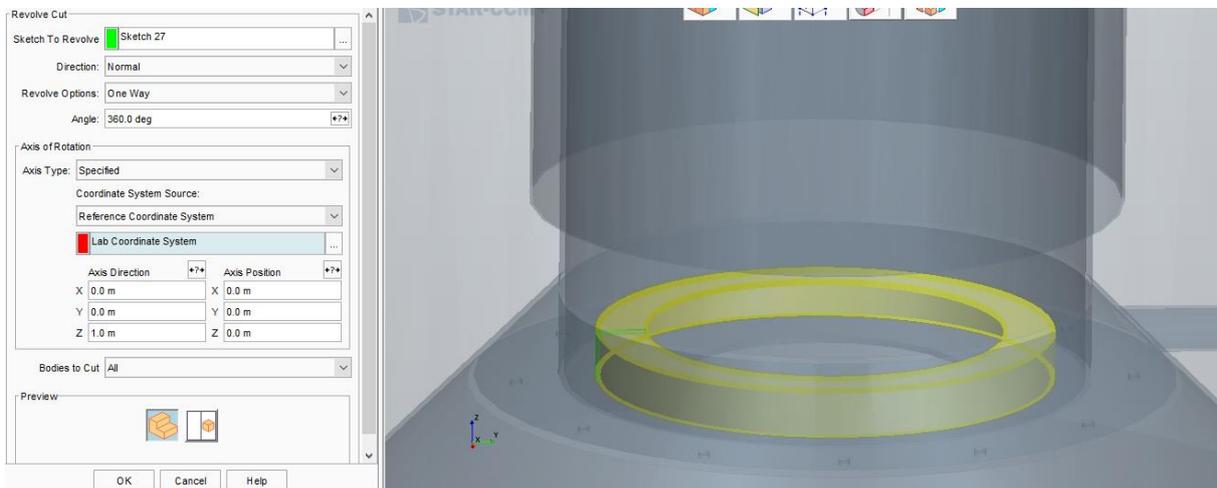


Ilustración 27: Creación de la estructura final del bandaje mediante revolucionado del sketch

En cuanto a las distintas posiciones del bandaje regulable, se ha estudiado cuales son las configuraciones reales disponibles en el equipo. De acuerdo con el archivo 3D Navisworks de la planta piloto, la altura máxima a la que se podría elevar el bandaje es de 8 cm, ya que existe un tornillo que ejerce como tope, véase imagen inferior.

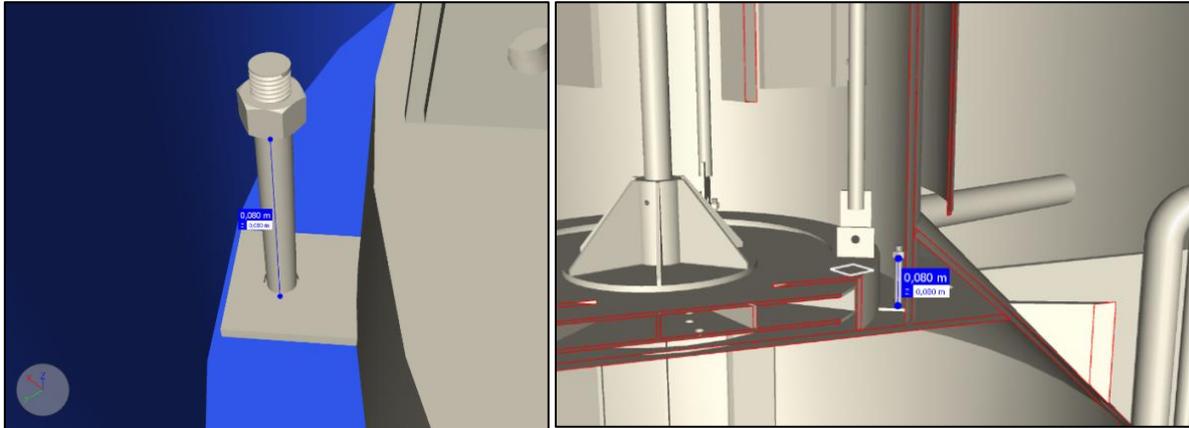


Ilustración 28: Altura de regulación del bandaje

Además de esto, se suele vaciar el decantador varias veces por año para proceder a su limpieza, de modo que se aprovechó uno de estas oportunidades para tomar fotografías del interior del equipo, conocer la posición actual del bandaje (se encontraba abajo del todo, es decir, cerrado) y documentar las diferentes alturas a las que pueda regular. En las imágenes inferiores se puede observar en la parte izquierda el interior del decantador vacío y el sistema de manipulación manual de la altura del bandaje mediante cuatro varillas metálicas, situado en la parte superior del decantador.



Ilustración 29: (izq.) interior del decantador vacío, (dcha.) varillas de regulación del bandaje

Una vez realizada la toma de contacto con el equipo y el bandaje, se concluye que el número de posiciones del bandaje a plantear debería de ser nueve. Una por cada centímetro de elevación del bandaje desde su posición cerrada (0 cm) hasta su altura máxima (8 cm).

Adicionalmente, se ha documentado en bibliografía relacionada con este proyecto cierta convención a la hora de hablar de la altura del bandaje de regulación en decantadores circulares en forma de porcentajes de elevación de dicha estructura. Correspondiéndose una apertura del 0% a un bandaje totalmente cerrado, estando este en contacto con la pared de la campana que separa las dos zonas de reacción y una apertura del 100% al elemento totalmente elevado, dejando libre la parte del agitador que actúa como impulsor (Degrémont).

7.2. Geometrías elaboradas

Se han confeccionado tres modelos en los cuales se va aumentando progresivamente el nivel de detalle de los elementos del interior del decantador y, además, se ha considerado conveniente, generar diferentes configuraciones de altura (desde 0 a 8 cm) para el bandaje regulable de la turbina en cada uno de los modelos. De esta forma, se tendrán 3 geometrías en creciente grado de detalle para las cuales habrá 9 posiciones del bandaje, totalizando un total de 27 geometrías clasificadas en:

- Geometría básica: cuenta con la estructura principal del decantador, la turbina, dos mirillas, tuberías de entrada, salida y rebose de agua y el bandaje.
- Geometría media: se añaden los cuatro deflectores del interior de la campana y los dos concentradores de fangos en servicio (cerrados) a los elementos de la geometría básica
- Geometría completa: además de los elementos de la geometría media, cuenta con ocho refuerzos de apoyo de la campana y otros ocho del rebosadero, con las dos varillas de manipulación de los concentradores de fangos, las cuatro varillas de guía del bandaje de regulación, las dos tuberías de salida de aire de la cámara tórica o de reparto y el eje de la turbina. Se trata de la geometría del decantador descrita en su totalidad.

A continuación, se muestran tres de las posiciones del bandaje regulable de la turbina, en la primera de ellas el elemento se encuentra abajo del todo, en la segunda a media altura y en la última en su máxima elevación.

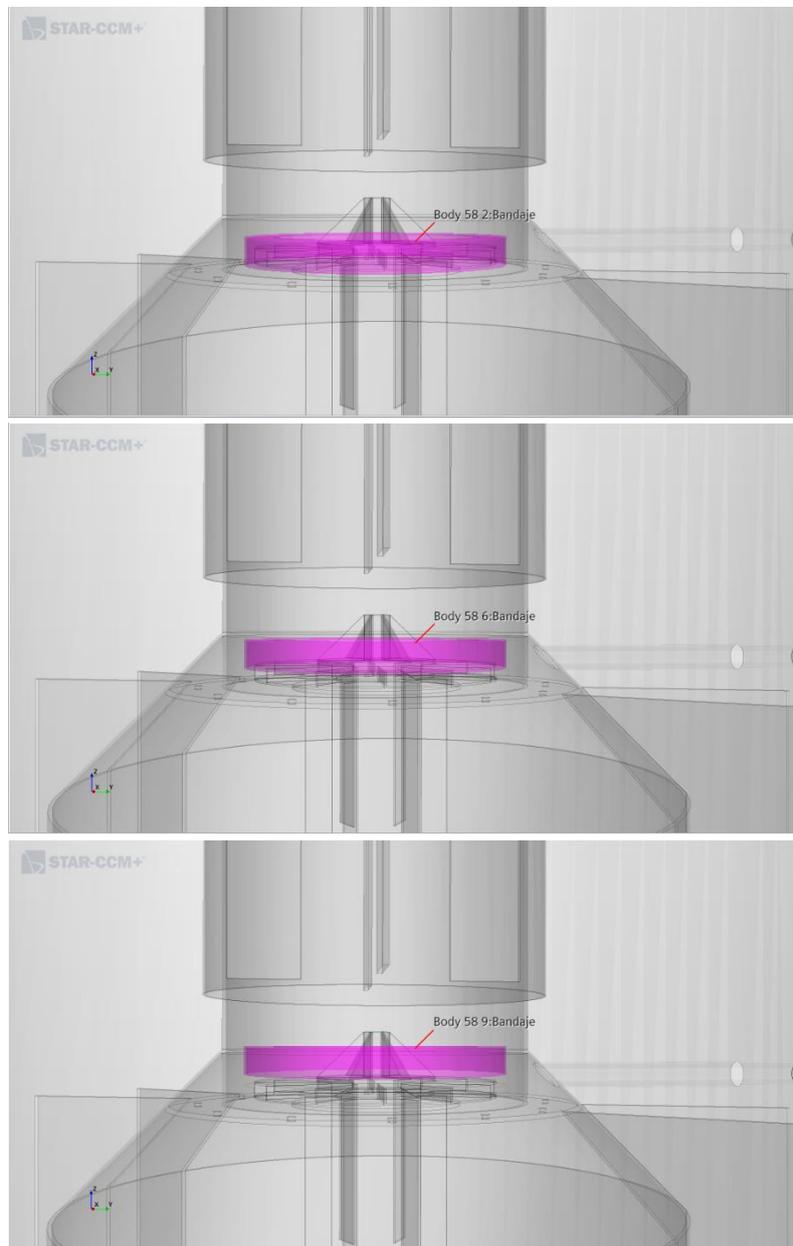


Ilustración 30: diferentes posiciones del bandaje regulable de la turbina

7.2.1. Geometría media

Se van a exponer únicamente los detalles de construcción y geométricos de los modelos de nivel de detalle medio, ya que son estos los que se van a utilizar a la hora de simular, tratando, así, de alcanzar un equilibrio entre grado de detalle del modelo 3D y el tiempo de cálculo, el cual aumenta según crece el nivel de detalle de los modelos.

Se muestra en la imagen inferior las operaciones realizadas en el programa 3D-CAD para generar la geometría media. Se han efectuado un total de 125 operaciones entre las que se encuentran cerca de 60 bocetos base para generar la geometría, más de 20 extrusiones, más de 30 vaciados, figuras de revolución y transformación de planos base de dibujo.

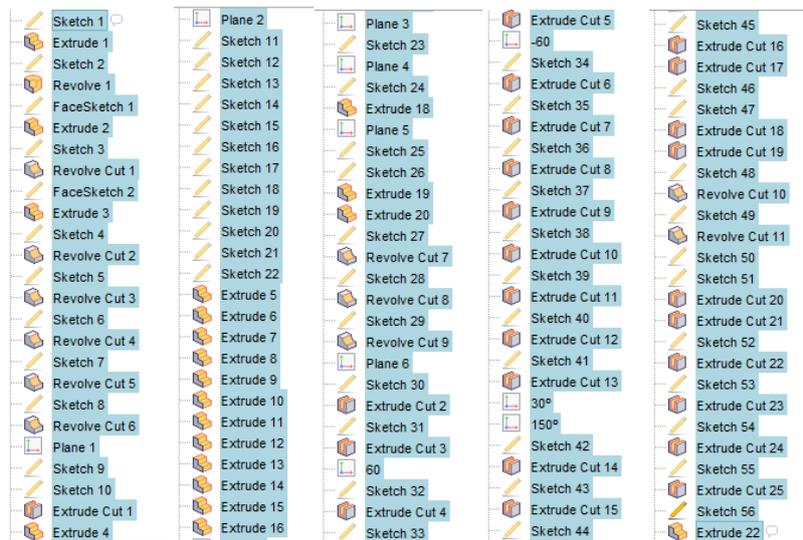


Ilustración 31: Operaciones realizadas en el programa 3D-CAD

Se presenta en la imagen inferior el modelo correspondiente a la geometría media, que incluye la turbina, las mirillas, las tuberías de entrada, salida y rebose de agua, los concentradores de fangos en servicio y los deflectores en el interior de la campana. En la ilustración se puede observar la estructura interna en forma de campana, rodeada de una camisa cilíndrica en la mitad superior. En la parte exterior del decantador se encuentran los dos concentradores de fangos. El vertedero o rebosadero está en la zona superior externa.

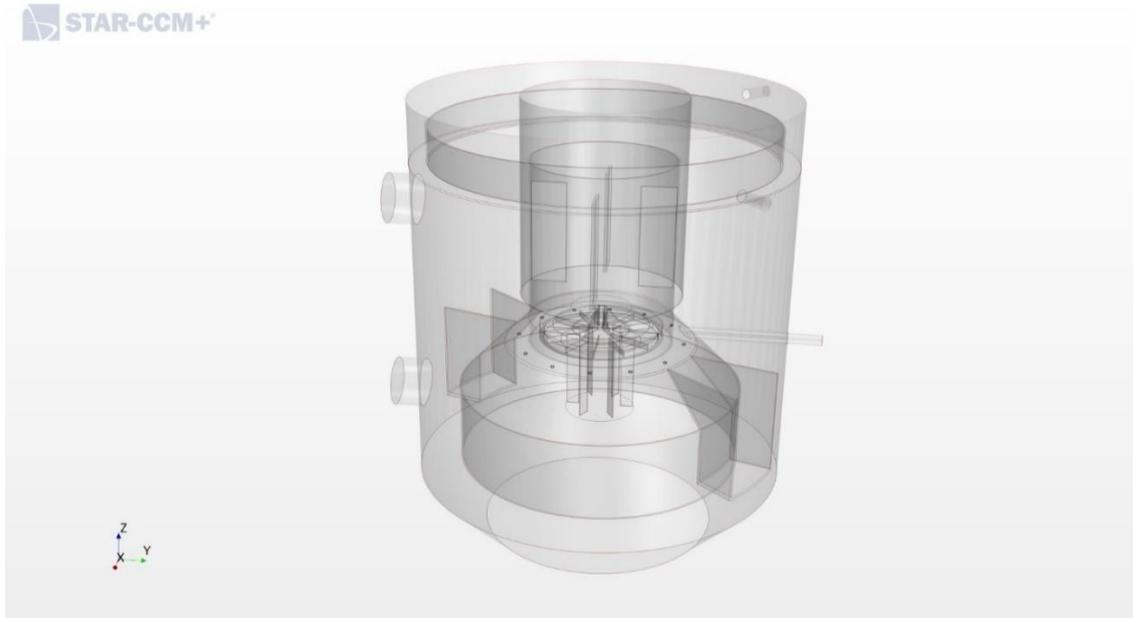


Ilustración 32: modelo 3D del decantador, en su geometría media

En esta otra imagen inmediatamente inferior, se aprecia la zona de la turbina o agitador, con la geometría de la misma descrita al completo. Así mismo, se observa la tubería de entrada de $\text{Ø}65$ mm de agua bruta que se conecta a la cámara tórica con forma de triángulo revolucionado en torno a un eje externo y desde la que se reparte el fluido a través de los 12 pequeños orificios de $\text{Ø}20$ mm a la cámara central en el interior del decantador.

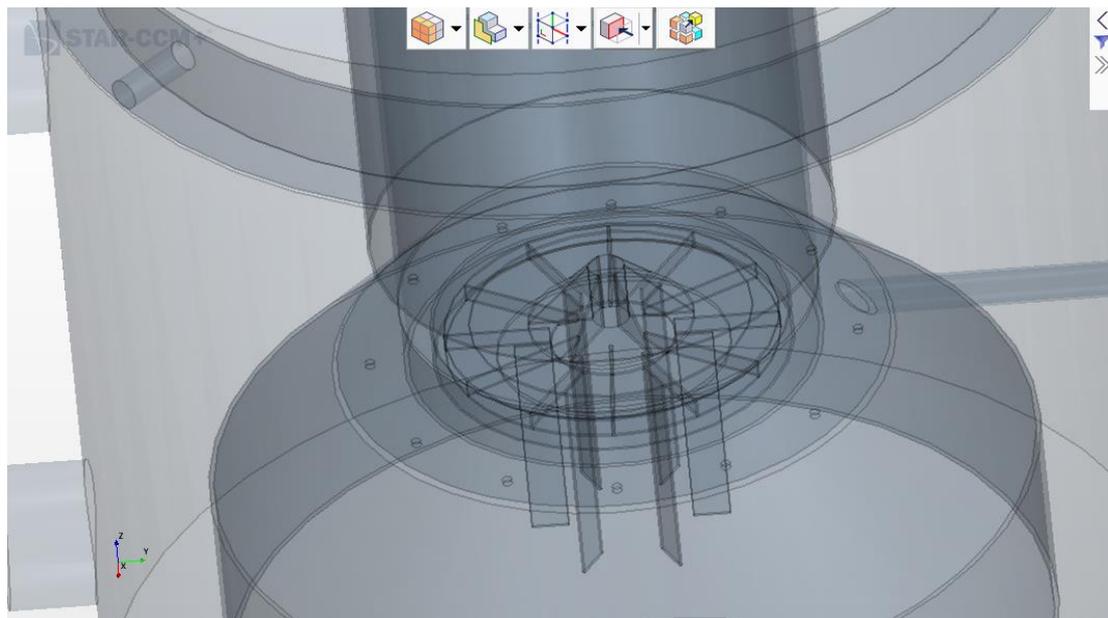


Ilustración 33: Modelo 3D de la turbina o agitador

Además de las estructuras ya mencionadas, ha sido necesario confeccionar una geometría auxiliar que rodee o envuelva la turbina, de forma que se pueda simular el movimiento de rotación del agitador como se explicará más adelante en el apartado de modelos físicos. Se presenta a continuación dicha estructura sombreada en amarillo, que trata de adaptarse a la forma externa de la turbina mediante una composición de tres cilindros macizos de diferentes longitudes y diámetros.

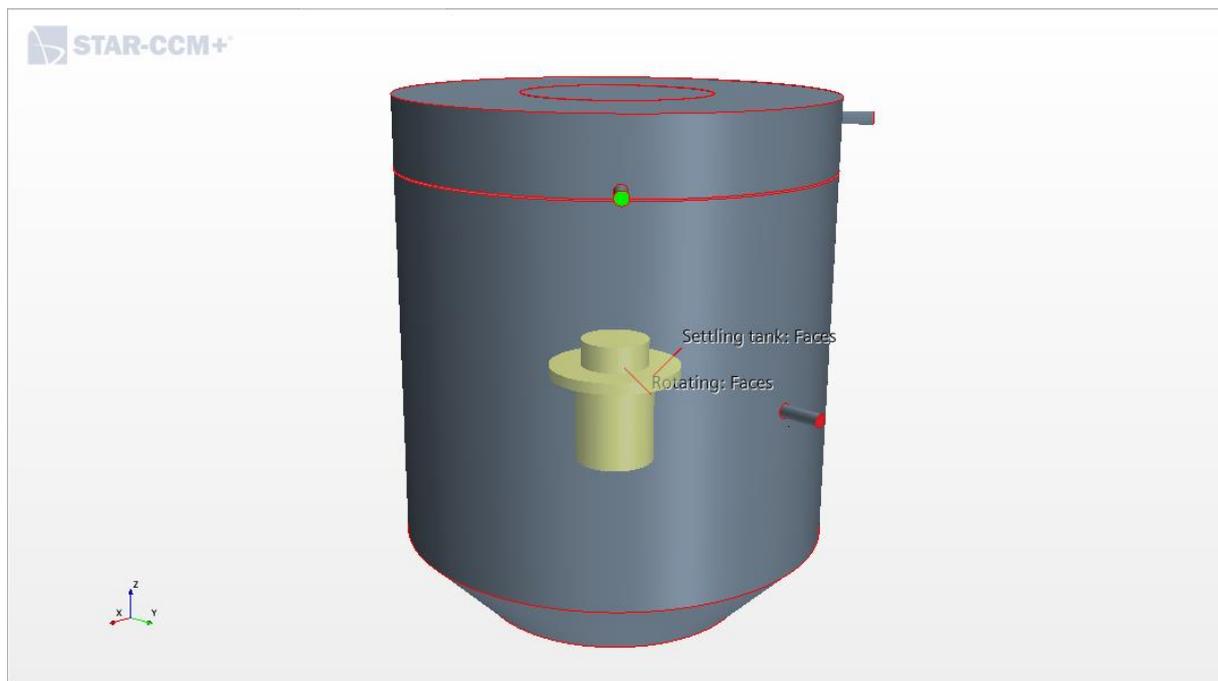


Ilustración 34: Geometría auxiliar que rodea o envuelve la turbina, señalada de color amarillo

Por último, la geometría del decantador generada hay que segregarla en diferentes partes de forma que se puedan seleccionar las apropiadas condiciones de contorno para cada una de ellas.

Así, se ha separado de la estructura principal del decantador la entrada de agua bruta (marcada en rojo en la parte central de la imagen inferior), la salida de agua decantada (marcada en granate en la parte superior izquierda de la imagen inferior), la salida de rebose de agua (marcada en fucsia) y la "tapa" del decantador que en realidad no es tal, sino que está abierto a la atmósfera (marcada en naranja en la parte superior).



Ilustración 35: partes principales del decantador: entrada de agua bruta (marcada en rojo), la salida de agua decantada (marcada en granate), la salida de rebose de agua (marcada en fucsia) y la "tapa" del decantador (marcada en naranja)

8. MALLADO

Una vez obtenida o generada la geometría, se pasa a la segunda de las etapas en la utilización de un software CFD, el mallado o meshing.

Como se ha comentado previamente, se parte del modelo 3D inicial y se realiza una discretización, es decir, se divide la geometría en muchísimos pequeños elementos llamados celdas, que en el caso de este proyecto contarán con forma hexaédrica.

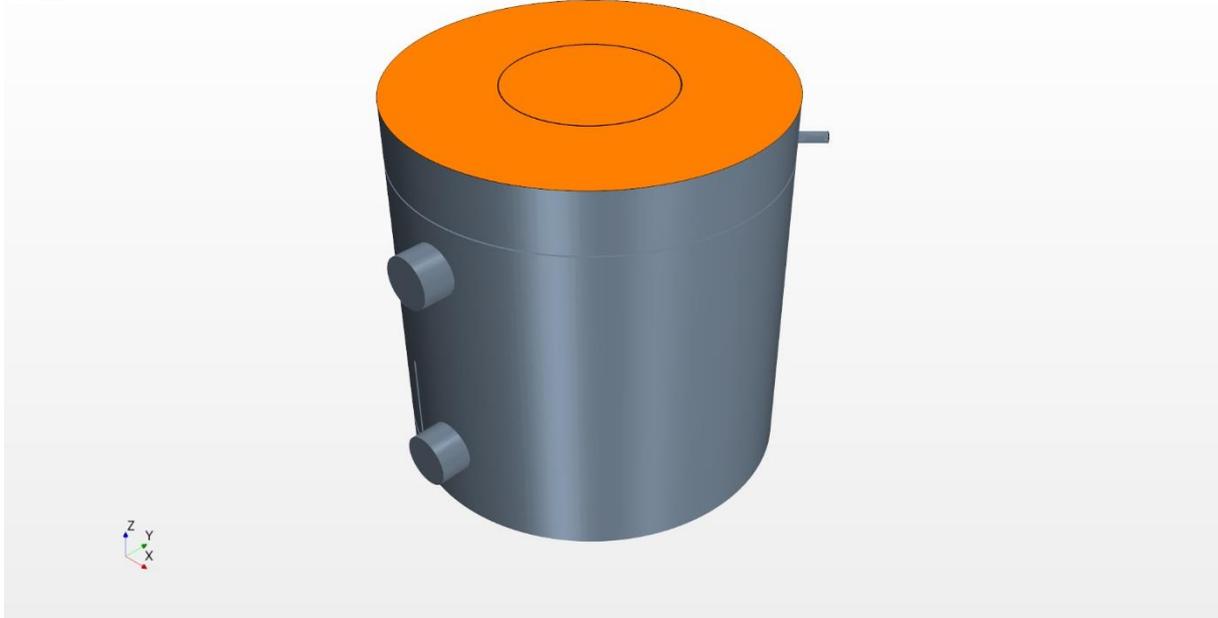
El número de celdas que se han obtenido al realizar el mallado del decantador es de aproximadamente tres millones para todos los modelos utilizados (2 mill. 400 a 2 mill. 900). Se desglosa a continuación en una tabla el conteo de celdas para cada uno de los modelos utilizados.

<i>Descripción</i>	<i>Altura del bandaje</i>	<i>N.º de celdas</i>
Geometría media	0 cm	2.394.541
Geometría media	1 cm	2.850.270
Geometría media	2 cm	2.821.750
Geometría media	3 cm	2.825.012
Geometría media	4 cm	2.825.807
Geometría media	5 cm	2.882.243
Geometría media	6 cm	2.825.597
Geometría media	7 cm	2.810.285
Geometría media	8 cm	2.451.344

Tabla 3: Modelados 3D realizados, junto a la altura del bandaje y el N.º de celdas del mallado

Se presenta a continuación el modelo 3D utilizado y seguidamente el mallado generado según una serie de parámetros consignados por el usuario.

STAR-CCM+



STAR-CCM+

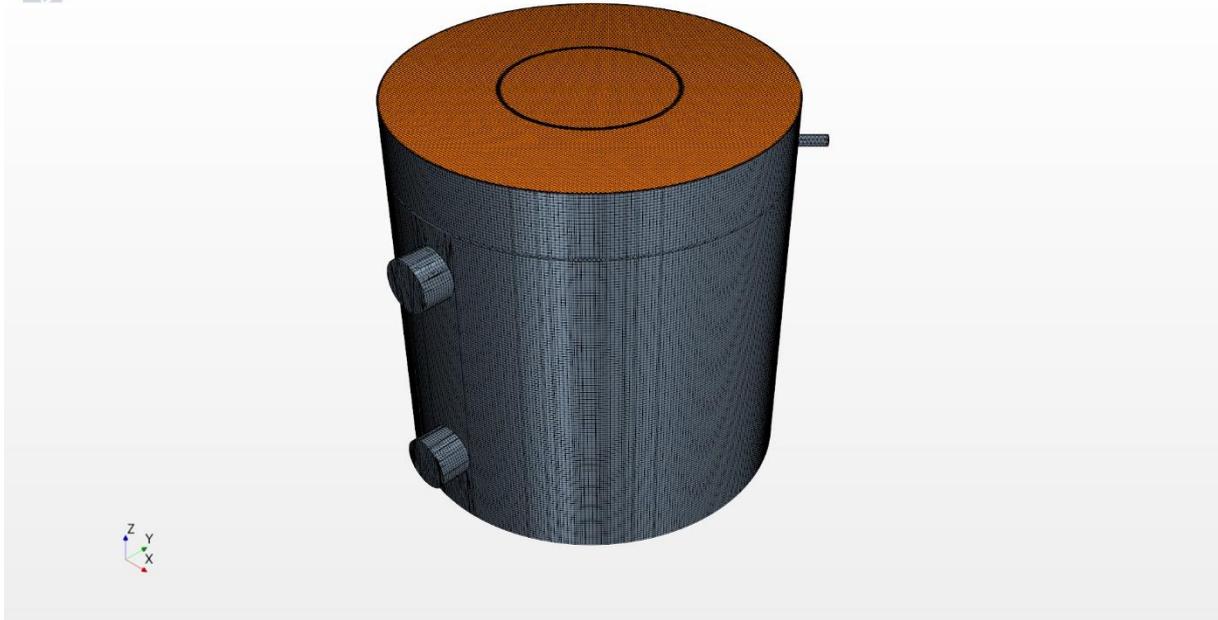


Ilustración 36: a) modelo 3D utilizado y b) su mallado

Como se ha mencionado previamente, el software necesita de una serie de parámetros definidos por el usuario para realizar el mallado.

Entre estos parámetros están:

- Selección de los métodos de mallado, existen varios métodos de los cuales se escogen:
 - Remesher: Remallado superficial utilizado para mejorar la discretización de figuras con formas geométricas complejas o intrincadas como es el caso de la turbina. Lo que hace es como un envoltorio de la geometría inicial mejorando la calidad del mallado.
 - Trimmed Cell: las celdas de la malla generada contarán con forma hexaédrica.
 - Automatic Surface Repair: es un método que, en caso de detectar algún fallo en el mallado, trata de corregirlo automáticamente.
 - Prism Layer Mesher o Mallado de la capa límite: permite refinar las zonas cercanas a las paredes de los elementos en los que tienen lugar los efectos de capa límite de un fluido (zonas perturbadas por la presencia de un sólido con la que está en contacto el fluido y en la que su velocidad respecto al sólido varía desde 0 hasta el 99 % de la velocidad de la corriente no perturbada)

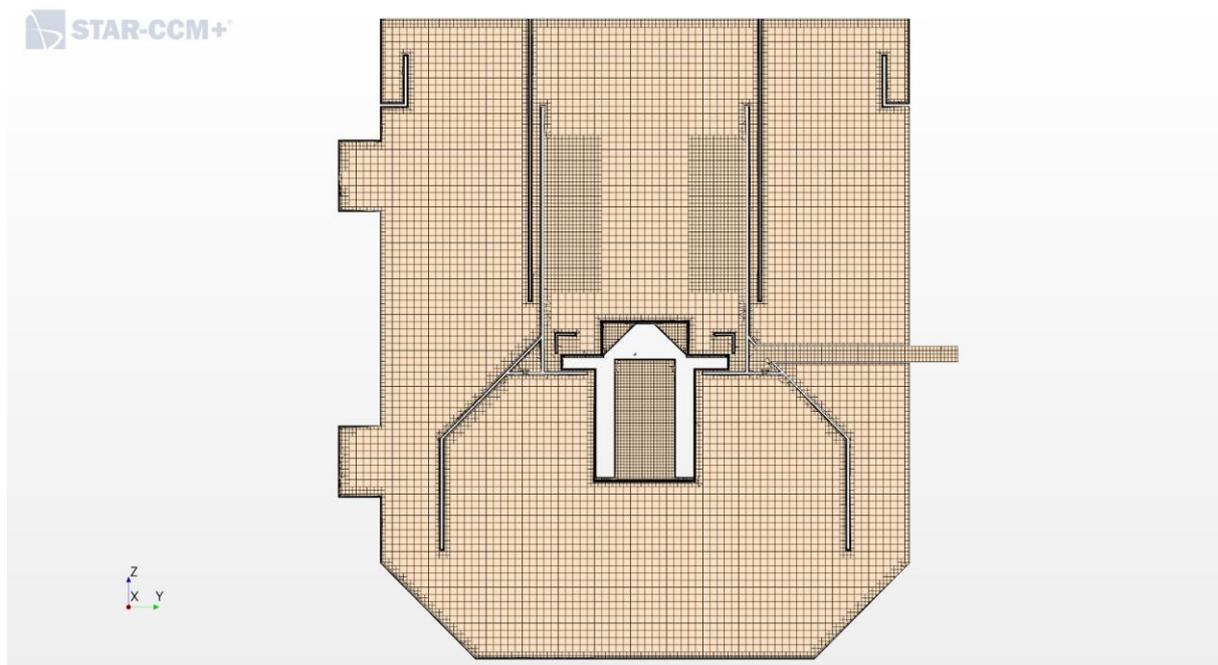


Ilustración 37: Mallado interior del decantador

- Tamaño base de celda: se define el tamaño de lado de la celda hexaédrica de referencia. Se utilizan dos tamaños separados:
 - 3 cm para la zona estática
 - 2,5 cm para la zona de la turbina: esto porque la turbina tiene una mayor complejidad geométrica y las velocidades son mayores e interesa tener un mayor control sobre las velocidades en esta zona.
- Refinado del mallado: en la zona de la interfase entre la turbina y el resto del decantador, en la zona de la turbina, la zona de la capa límite y la tubería de entrada.
- En cuanto a los parámetros definidos para la capa límite:
 - Número de capas límite: 4
 - Tamaño de la capa en relación al tamaño base de las celdas: 33%

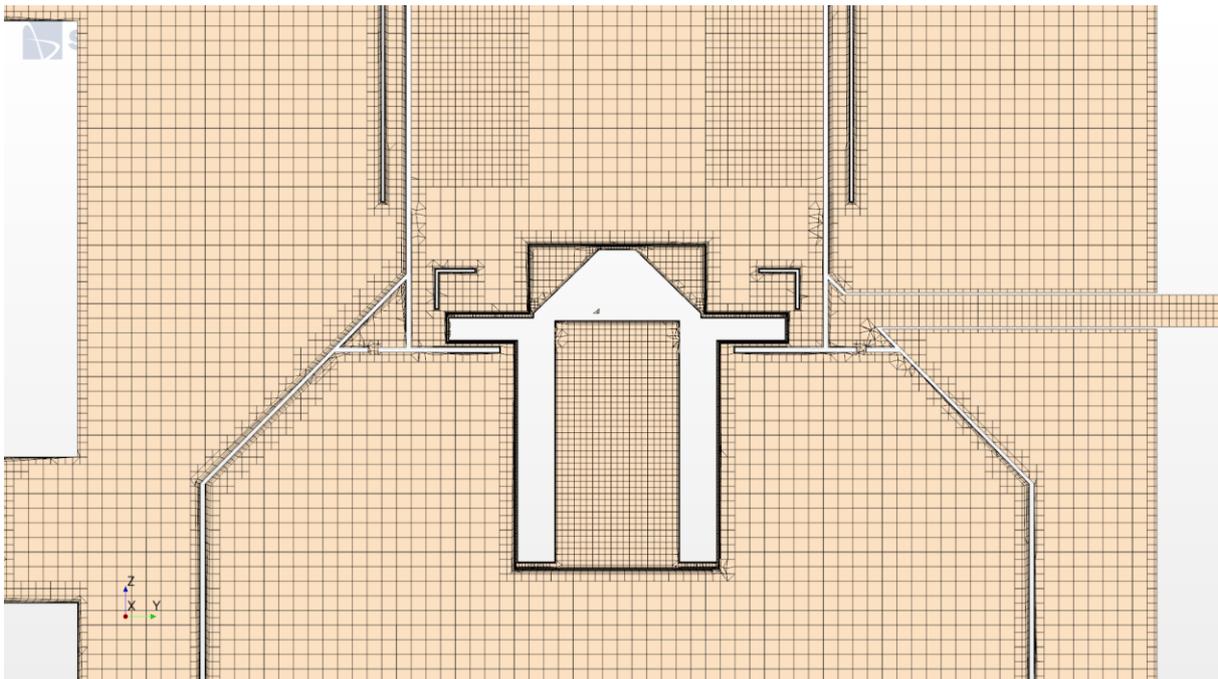


Ilustración 38: Detalle del mallado en la zona de la turbina

Respecto al tamaño de los archivos, se mueven alrededor del 1,5 o 2 GB. Esto para cada uno de los modelos.

9. MODELOS FÍSICOS

Seguidamente a la realización del mallado se han de implementar y configurar los modelos físicos, que son las ecuaciones matemáticas que gobiernan la mecánica de fluidos. Algunas de las cuales ya han sido mencionadas y descritas detalladamente en el apartado 6. ¿En qué consiste el CFD?

Los modelos físicos se encuentran implementados en el propio software Star-CCM+ y son escogidos por el usuario a través de una ventana de selección de modelos físicos que presta asistencia recomendando y seleccionando la combinación apropiada de modelos.

Estos modelos definen cómo se representan los diferentes fenómenos físicos ocurrentes, es decir, definen las variables principales de la simulación CFD (presión, temperatura y velocidad) y las ecuaciones matemáticas que gobiernan los procesos para llegar a obtener una solución y ayudar a presentar la información generada al usuario.

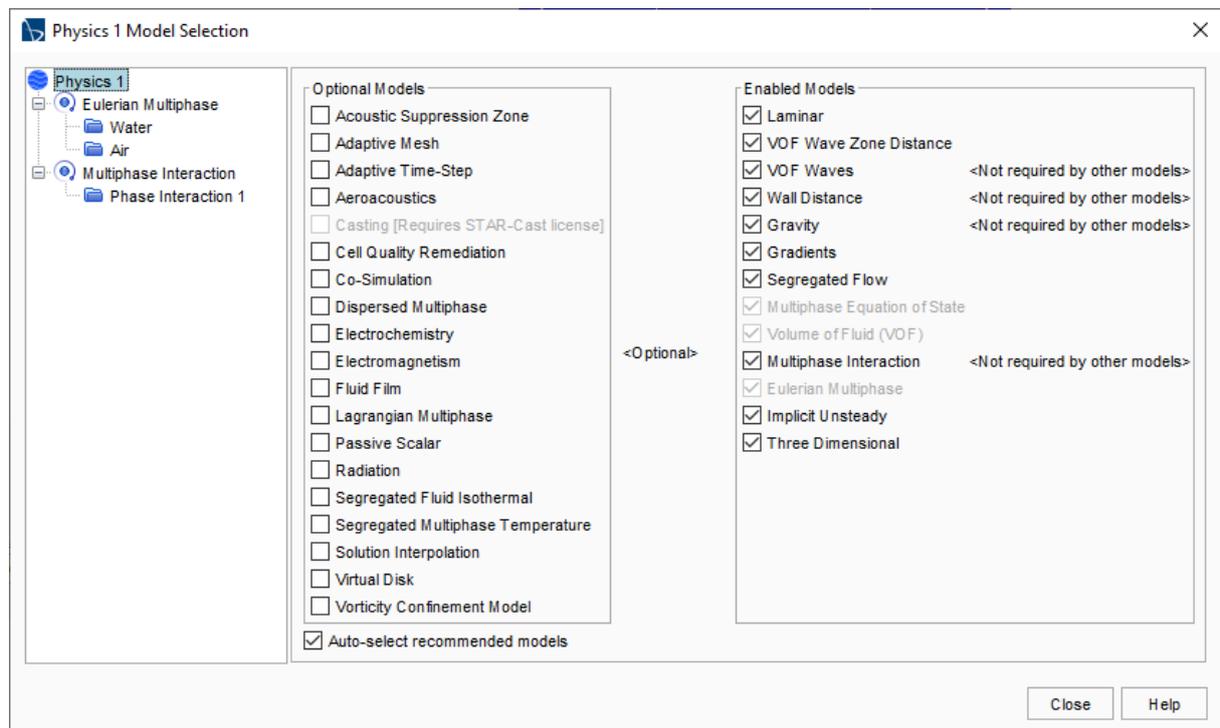


Ilustración 39: Ventana de selección de modelos físicos en el Star CCM+

En la figura superior se puede apreciar una captura de la ventana de selección de modelos físicos disponibles en el software Star-CCM+. Se han seleccionado

aquellos modelos que permiten describir los fenómenos físicos ocurrientes en el interior del decantador o al menos una simplificación de ellos (Siemens, 2019):

- **Método tridimensional:** al tratarse de una geometría con diferentes volúmenes y flujos de agua que se mueven en las tres dimensiones espaciales por el interior del decantador.
- **Modelo multifase euleriano:** permite describir una circunstancia como la del decantador, un tanque abierto por su parte superior en el que se contienen dos fases: aire y agua.
 - Tanto el aire como el agua van a ser considerados fluidos de densidad y viscosidad dinámica constante. En el caso del aire no se van a dar velocidades que superen el valor límite de compresibilidad de 100 m/s. Los valores de la densidad y viscosidad dinámica para el aire serán de $1,1841 \text{ kg/m}^3$ y $1,85508 \cdot 10^{-5} \text{ Pa}\cdot\text{s}$ respectivamente.
- **No estacionario:** al contener una turbina en rotación, exige la selección de este modelo, en el cual las propiedades del fluido varían y dependen en función del tiempo.
- **Implícito:** por la forma de resolver las ecuaciones, las cuales interesa que se resuelvan iterativamente en todas las celdas del modelo al mismo tiempo
- **Flujo de tipo laminar:** para describir el tipo de flujo se ha utilizado finalmente el tipo laminar que es el que predomina en la mayor parte del decantador (es requerido para que se produzca la sedimentación de las partículas), si bien es cierto que, en ciertas zonas, como son la zona de reparto de agua bruta y la zona de la turbina el tipo de flujo es turbulento.
- **Volume of Fluid (VoF):** calcula la fracción de volumen de una de las fases en todo el dominio. Cabe remarcar que este modelo impide que los fluidos se mezclen entre sí. Se trata de una técnica de modelado de la superficie libre. Las ecuaciones de Navier-Stokes que describen el movimiento del flujo se resuelven por separado.
- **VOF Waves:** permite generar la superficie libre del agua y el gradiente de presión hidrostática.
- **Gravedad:** tiene en cuenta los efectos de la aceleración gravitacional producidos sobre elementos. Transforma la presión de trabajo en la presión piezométrica.

Hay otros fenómenos físicos ocurrientes en el equipo, que no han podido ser implementados en esta modelización CFD, como son la decantación

propiamente dicha, la sedimentación de partículas y la floculación, las cuales quedan como posibles futuras líneas de investigación.

Rotating Reference Frame

Aparte de estos modelos físicos, también se debe solucionar la descripción de la rotación de la turbina en el programa. Para ello existen varios métodos que se han testado a la hora de realizar este proyecto. Se ha elegido uno denominado *Rotating Reference Frame* al ser el que proporciona los mejores resultados y por la sencillez de su configuración.

La forma de implementar la rotación de la turbina a través del método elegido consiste en crear un cuerpo que envuelva la turbina y que gire de forma virtual junto a ella, relacionándose con el resto del volumen del decantador a través de una interfase que consistirá de las paredes del cuerpo de nueva creación.

En la imagen inferior se muestra la turbina en color rosa mientras que la región que envuelve está sombreada en amarillo. El conjunto se encuentra en el interior del decantador, en su parte central.

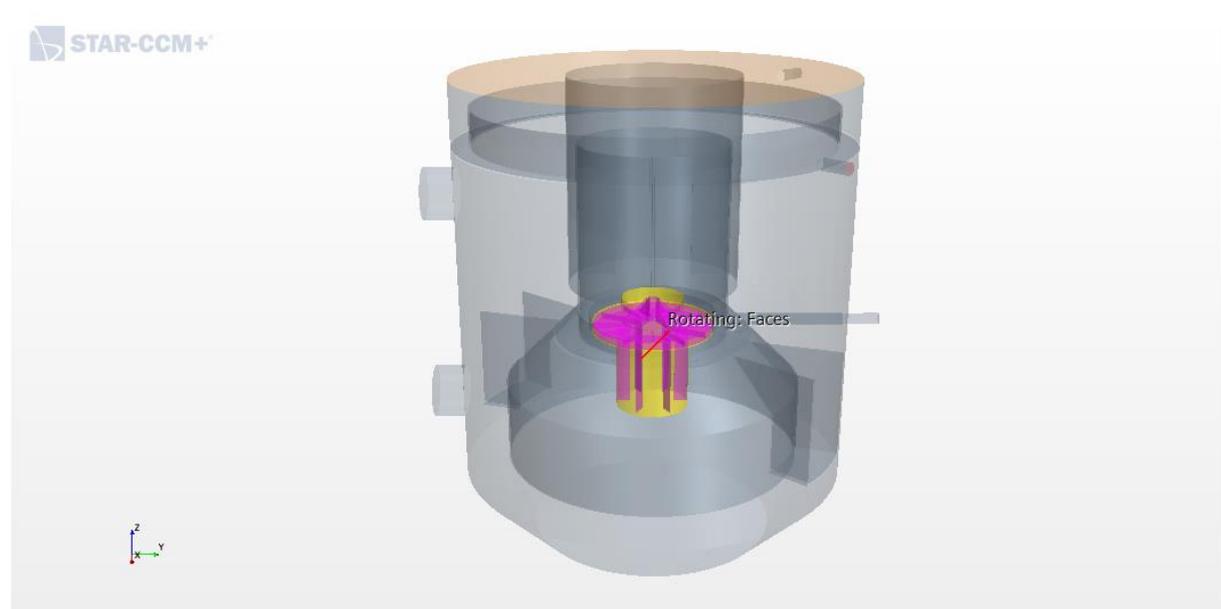


Ilustración 40: Localización de la turbina (en color rosa) y la región que la envuelve (en color amarillo) en el interior del decantador.

Seguidamente se debe crear un sistema de referencia nuevo exclusivamente para la turbina y el cuerpo que la envuelve aparte del sistema de referencia base. Finalmente se define una velocidad angular para el nuevo sistema de referencia y con ello se consigue el giro deseado que se simulará de forma virtual.

La turbina del decantador de la planta piloto gira a una velocidad angular variable desde el ordenador de control de la instalación, pero para este proyecto se ha seleccionado un valor constante de 12 rpm.

10. CONDICIONES DE CONTORNO

Una vez realizado el mallado, y habiendo diferenciado previamente varias regiones separadas, se debe proporcionar una condición de contorno para cada una de ellas.

Se define como condiciones de contorno a aquellos datos que el software CFD requiere que se proporcionen a partes de cada región para que resuelva las ecuaciones de la mecánica de fluidos. Es imprescindible que estas condiciones estén bien definidas dado que influyen sobremanera en la solución obtenida.

Las condiciones de contorno definidas en el caso de este proyecto son las siguientes y se pueden observar en la imagen inferior:

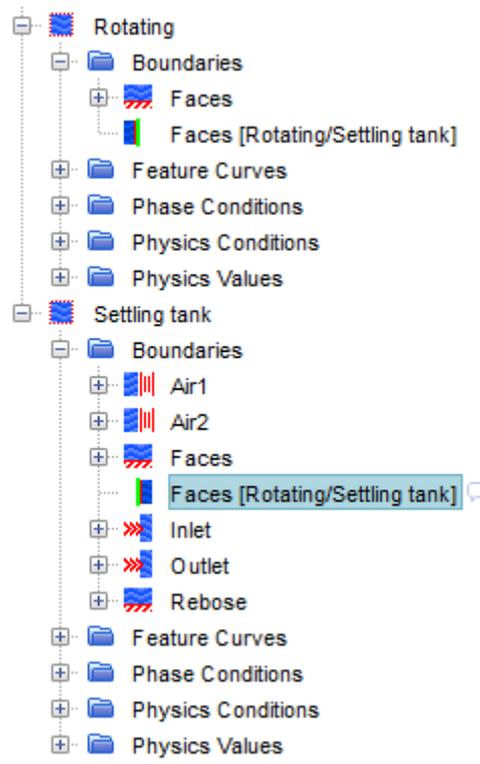


Ilustración 41: Árbol de selección de condiciones de contorno

Turbina (marcada como carpeta Rotating en la imagen)

- Región "Faces": está conformada por toda la superficie correspondiente a las paredes de todos los elementos que conforman la turbina.
- Región "Faces [Rotating/Settling tank]": se trata de la interfase entre el cuerpo que envuelve a la turbina y el resto del decantador. La condición de

contorno en este caso es el tipo de interfase, que en este caso es interfase interna.

Decantador (marcado como Settling tank en la imagen)

- Región "Air1" y "Air2": se trata de las superficies superiores del decantador, las que conforman lo que sería la "tapa" del mismo. En realidad, el equipo se encuentra abierto a la atmósfera con lo que para simular esto, se identifican cada una de ellas como salidas de presión.
- Región "Faces": está conformada por toda la superficie correspondiente a la pared del decantador tanto externas como internas. La condición de contorno en este caso se trata de la rugosidad de la superficie de la pared que será de 0,25 mm.
- Región "Faces [Rotating/Settling tank]": se trata de la interfase entre el cuerpo que envuelve a la turbina y el resto del decantador. La condición de contorno en este caso es el tipo de interfase, que en este caso es interfase interna.
- Región "Inlet": se trata de la superficie perpendicular a la pared de la conducción de agua bruta y que constituye el orificio de entrada a la tubería de agua. Se identifica como una entrada de velocidad en el software. La condición de contorno para esta región se corresponde con la velocidad del flujo de agua a la entrada que será de 0,532 m/s, obteniéndose ésta a partir del dato de caudal volumétrico de agua de entrada al decantador definido por el proyecto constructivo $Q = 6,25 \text{ m}^3/\text{h}$.
- Región "Outlet": se trata de la superficie perpendicular a la pared de la conducción de agua decantada y que constituye el orificio de salida del agua del decantador. Se identifica como una salida de velocidad en el software. La condición de contorno para esta región se corresponde con la velocidad del flujo de agua a la salida que será la misma que la de entrada, pero negativa, esto es, - 0,532 m/s.
- Región "Rebose": se trata de la superficie perpendicular a la pared de la conducción de salida de agua de rebose en caso de que haya algún fallo de funcionamiento en el equipo y se evite el desbordamiento del mismo. En este caso se identifica como una pared ya que para las condiciones que se simulan no tendrá ningún uso.

11. RESULTADOS

11.1. Consideraciones previas

En las páginas venideras se muestran los resultados de las simulaciones realizadas para los nueve diseños del decantador circular de la planta piloto de Etxebarri correspondientes a la geometría de complejidad media con las nueve posibles posiciones del bandaje regulable que rodea la turbina (situado a una altura desde 0 cm hasta 8 cm).

La geometría media se compone de los siguientes elementos, ya descritos con anterioridad:

- Estructura interna del decantador: Paredes externas, campana central, camisa cilíndrica, cámara de reparto de agua bruta y vertedero perimetral exterior
- Turbina
- Dos mirillas
- Tuberías de entrada, salida y rebose de agua
- Bandaje regulable
- Cuatro deflectores del interior de la campana
- Dos concentradores de fangos en servicio (cerrados) en la zona perimetral

11.1.1. Altura de lámina de agua

En cuanto a la altura de la lámina de agua, se ha establecido en 2,55 m. Se muestra a continuación la situación de partida con el decantador lleno hasta la altura definida. Como se ha comentado previamente en apartados anteriores, no ha sido posible simular lo que se conoce como decantación, es decir, la caída del agua por el vertedero perimetral superior, por lo que la zona aparece como llena de agua.

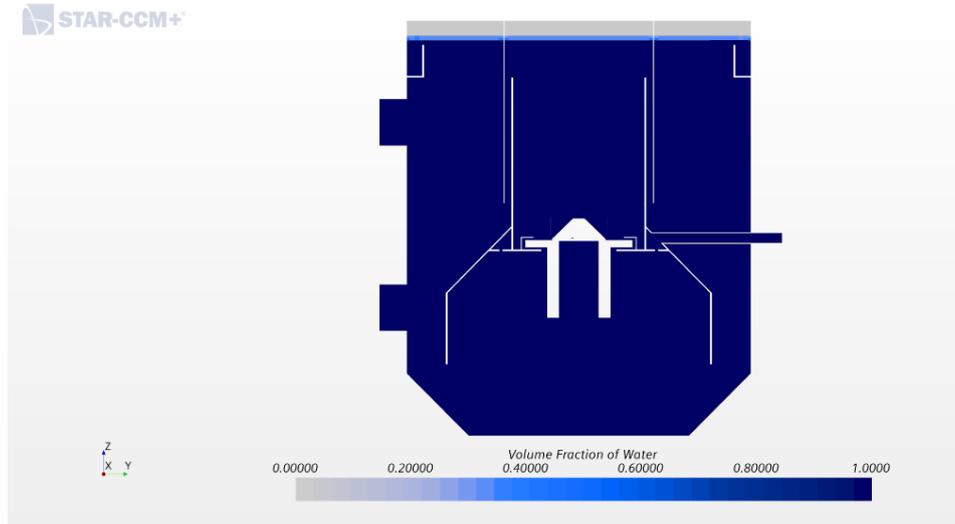


Ilustración 42: situación inicial con el decantador lleno hasta una altura de 2,55 m

11.1.2. Inicialización de la presión hidrostática

Mediante la utilización del modelo físico VOF Waves se evita tener que definir por parte del usuario a través de codificación. Este modelo incorpora una ecuación adicional que tiene en cuenta el gradiente de presión hidrostática. Se puede apreciar en la imagen siguiente la distribución de las presiones en el interior del decantador. La presión se va incrementando con la profundidad, expresado en la imagen como un color azul progresivamente más oscuro.

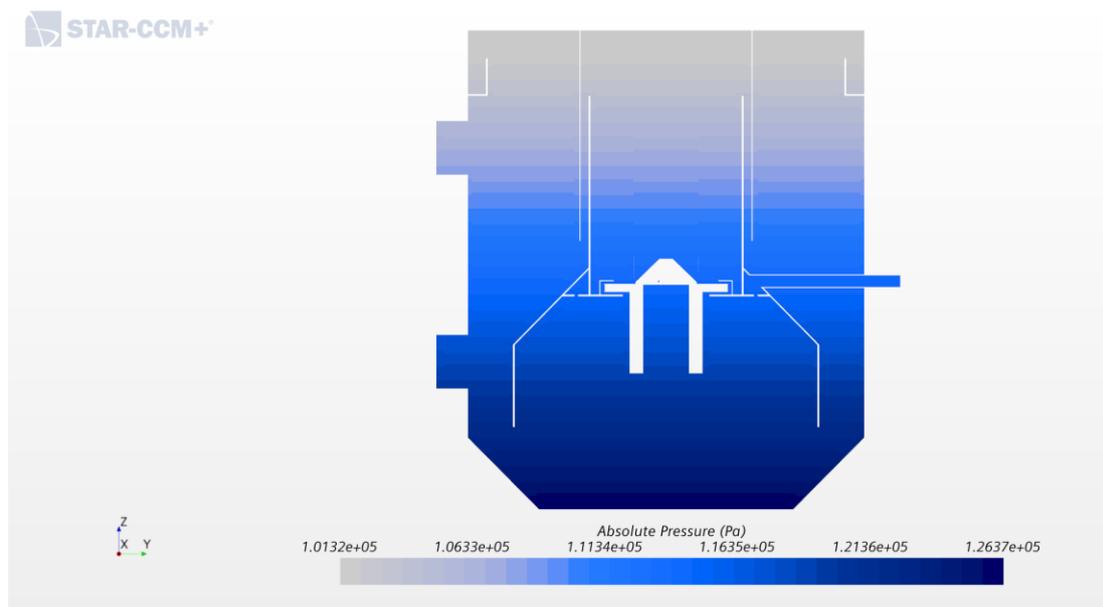


Ilustración 43: distribución de las presiones en el interior del decantador

11.1.3. Características del ordenador

El equipo informático utilizado para ejecutar todas las simulaciones cuenta con estas características:

- Procesador: Intel Core i7 de ocho núcleos a 3 GHz
- Memoria RAM: 64 GB instalados

11.1.4. Velocidad de la turbina

En una primera instancia se llegaron a simular todos los diseños de nivel de detalle medio para un valor de velocidad angular del agitador de 12 Hz, tal y como aparecía definido en la pantalla del SCADA de la planta piloto. A la hora de analizar los resultados obtenidos se reparó en la excesiva velocidad de los flujos en el interior del decantador, sobre todo en la zona de la turbina, una velocidad que era incluso superior a la necesaria para romper los flóculos en el caso real. Cabe decir, que estas velocidades eran del todo inadecuadas, pero coherentes con los datos iniciales que se habían recabado.

Investigando las causas de semejante disparidad en cuanto a velocidades, y con la ayuda del servicio de operación del CATABB que consultó a la empresa que realizó las pruebas de puesta en marcha de la planta piloto, se concluyó que la velocidad que aparece en la pantalla del SCADA etiquetada como Velocidad Decantador, no es la velocidad angular de la propia turbina, sino que es la velocidad del variador que sí es 12 Hz. En cuanto a la velocidad de la turbina, es la misma en valor que la del variador, pero en revoluciones por minuto, esto es, 12 rpm, es decir, 60 veces inferior.

Para ilustrar estos párrafos, se muestra en la imagen inferior la sección de la pantalla del SCADA de la planta piloto con la Velocidad Decantador recuadrada en rojo en la que aparece la velocidad en Hz.

DECANTADOR			
Velocidad Decantador:	11.00	Hz	
Tiempo de Parada Decantador:	0	min	00:00 mm:ss
Tiempo de Marcha Decantador:	60	min	60:00 mm:ss
Valvula 1 Tiempo entre Extracciones:	60	min	48:34 mm:ss
Valvula 1 Tiempo Extrayendo:	40	seg	00:40 mm:ss
Valvula 2 Tiempo entre Extracciones:	60	min	48:04 mm:ss
Valvula 2 Tiempo Extrayendo:	40	seg	00:40 mm:ss

Ilustración 44: Sección del decantador en la pantalla del SCADA de la planta piloto

Este pequeño detalle ha provocado que todas las simulaciones realizadas con una velocidad de la turbina de 12 Hz no sean realistas y los campos de velocidades sean muy superiores a las esperados. La media de tiempo de simulación requerido para llegar a resultados aceptables es de 5 o 6 días por cada uno de los modelos.

Se ofrece en la ilustración inferior un esbozo de las ejecuciones realizadas con la velocidad errónea.

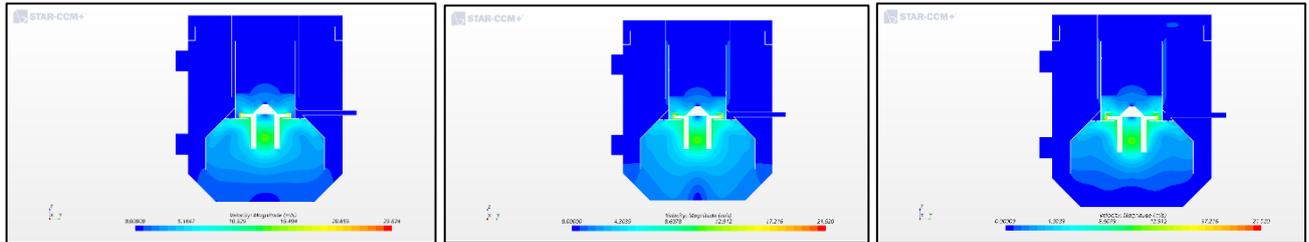


Ilustración 45: Simulaciones realizadas con velocidades erróneas

11.2. Simulaciones de la geometría media

Se presentan a continuación los resultados comentados para los nueve modelos, cada uno con una posición del bandaje 1 cm más alta que el anterior.

El tiempo medio de simulación para cada uno de los modelos ha sido de 5 o 6 días de continuos cálculos para llegar a una solución.

11.2.1. Posición bandaje 0 cm

Esta posición se corresponde con el bandaje cerrado, es decir, regulado a la altura más baja posible, estando en contacto su parte inferior con la estructura interna del decantador.

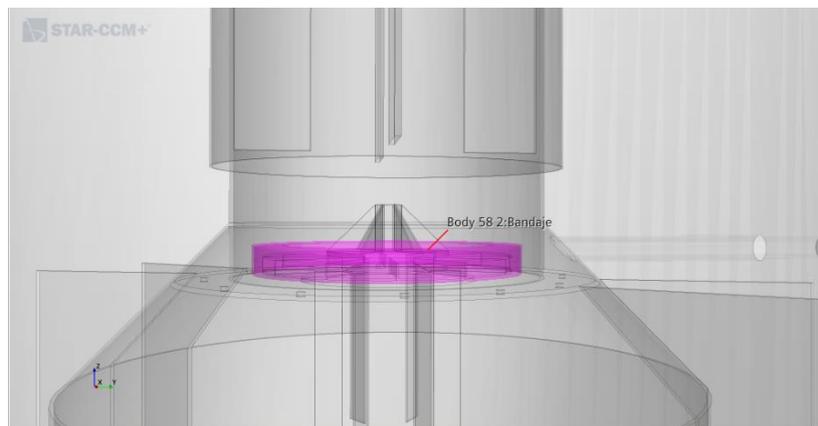


Ilustración 46: Posición del bandaje (marcado en color marrón) en el interior del decantador

Al analizar en detalle el comportamiento hidráulico del decantador, se ha reparado en la existencia de dos zonas claramente diferenciadas, como se puede apreciar en la siguiente imagen correspondiente a una sección vertical del decantador que pasa por su parte central y que divide la tubería de entrada de agua bruta en dos mitades.

Por un lado, está la zona perimetral externa a la campana en la que las velocidades son muy bajas, del orden de 0,007 m/s, que son las esperadas en una zona en la que se produce la sedimentación de partículas.

Por otro lado, está la zona interna de la campana, en la cual las velocidades son mucho más elevadas, en torno a un orden de magnitud superiores a la velocidad de la parte perimetral. Estas velocidades impiden que se produzca sedimentación en esta zona y permite la recirculación y agitación de los flóculos.

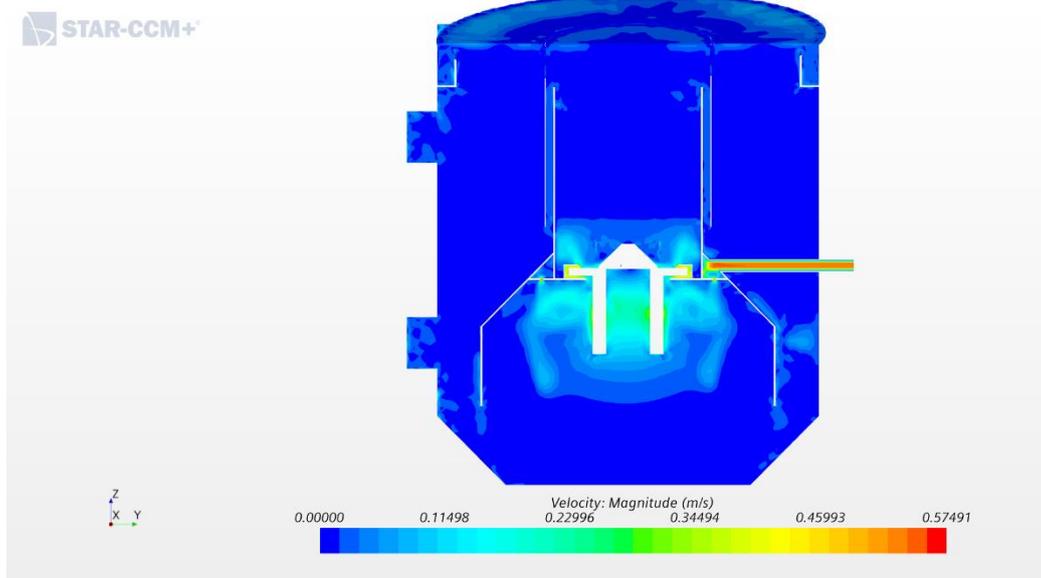


Ilustración 47: Campo de velocidades en el interior del decantador (bandaje cerrado)

En esta otra ilustración, se presentan los sentidos de flujo del agua en el interior del decantador trazados junto a las velocidades en escala de colores tipo arcoíris. Es posible apreciar el reparto de agua bruta a través de los orificios de la cámara tórica hacia la zona interior de la campana del decantador, los cuales dibujan un flujo casi vertical hacia abajo.

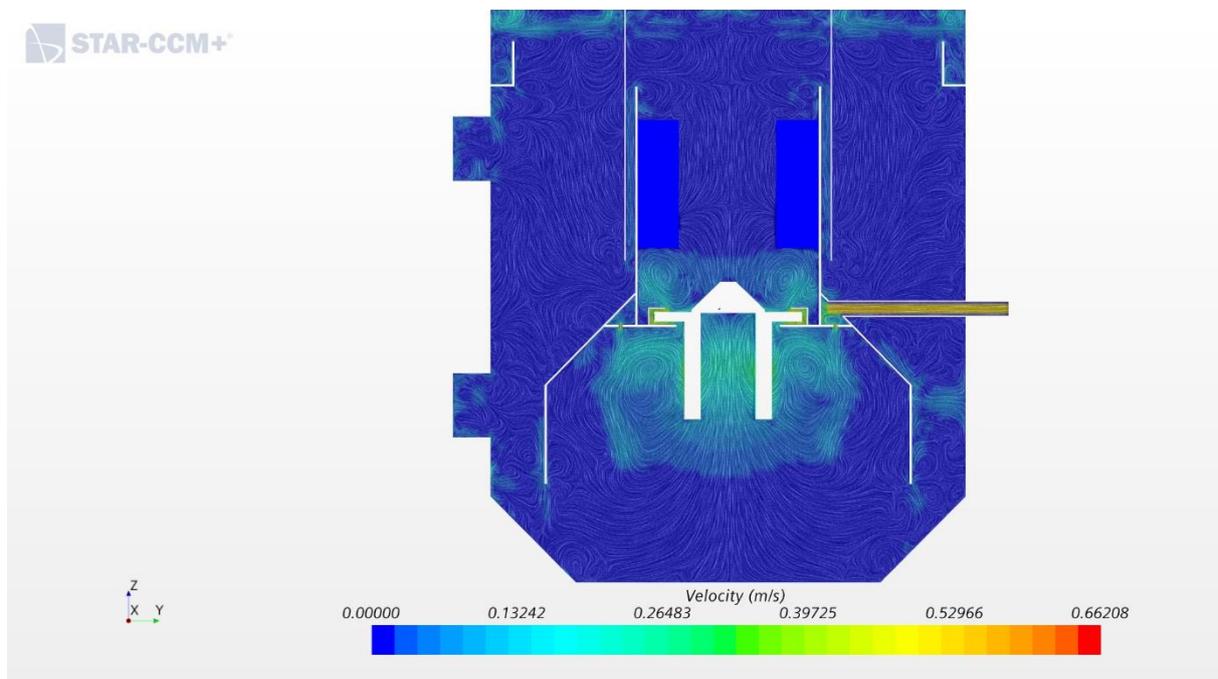


Ilustración 48: Sentidos de flujo del fluido en el interior del decantador (bandaje cerrado)

La turbina, por su parte, genera una agitación considerable en toda la parte interna de la campana además de impulsar el fluido hacia la parte superior. En la parte inferior genera dos remolinos girando en sentidos opuestos uno a cada lado del agitador.

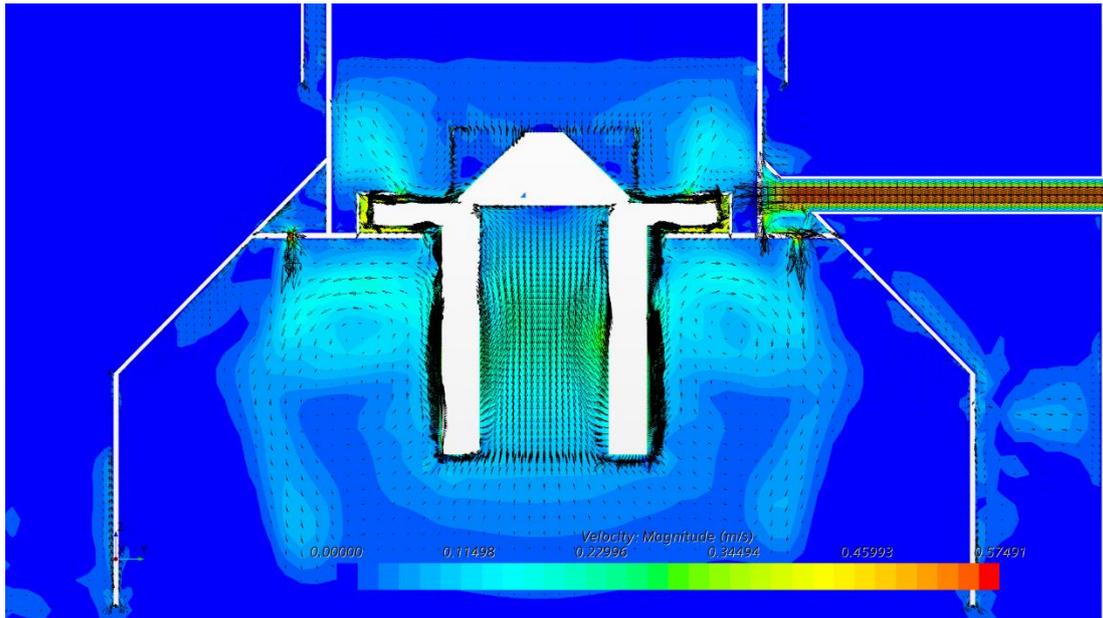


Ilustración 49: detalle del flujo en la zona de la turbina (bandaje cerrado)

En este caso, al estar el bandaje cerrado, dificulta la recirculación de fluido y el paso hacia la parte superior. Además, se genera una zona muerta en el perímetro exterior del bandaje, en donde será propenso la acumulación fangos y sedimentos en caso de prolongarse en el tiempo esta configuración.

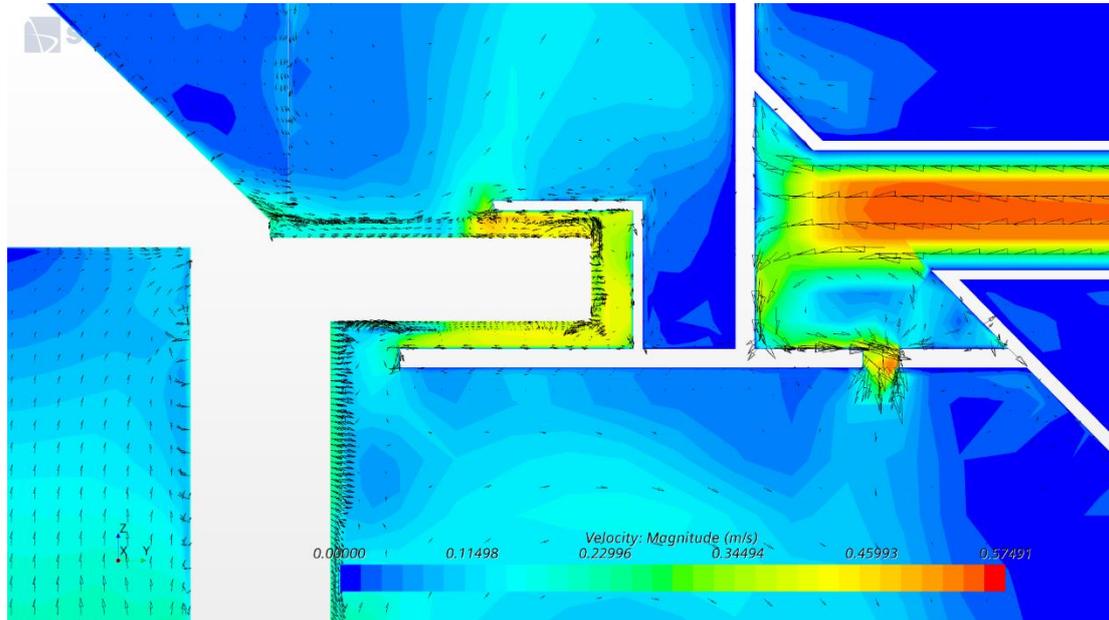


Ilustración 50: detalle del flujo en la zona del bandaje regulado a 0 cm

Se muestra ahora una sección horizontal a la altura de la cámara tórica de reparto de agua bruta. En ella se puede observar claramente diferenciadas las zonas perimetrales (en color azul intenso, sinónimo de velocidades bajas) e interior de la campana en donde se localiza la turbina. Los orificios de la cámara de reparto por donde se infunde agua a la zona interna de la campana se intuyen como pequeños círculos de color azul claro, en donde se elevan las velocidades.

También se aprecia el impacto del flujo de agua que llega desde la tubería de entrada (en la zona superior central de la imagen) donde colisiona con la pared de la cámara tórica y es orientado hacia los laterales de la misma.

La disposición espacial de estos 12 orificios de reparto sumado a que todos cuentan con el mismo diámetro, hace que haya variaciones de velocidad y con ello de flujo según el agua se va alejando de la zona de entrada de agua a la cámara tórica.

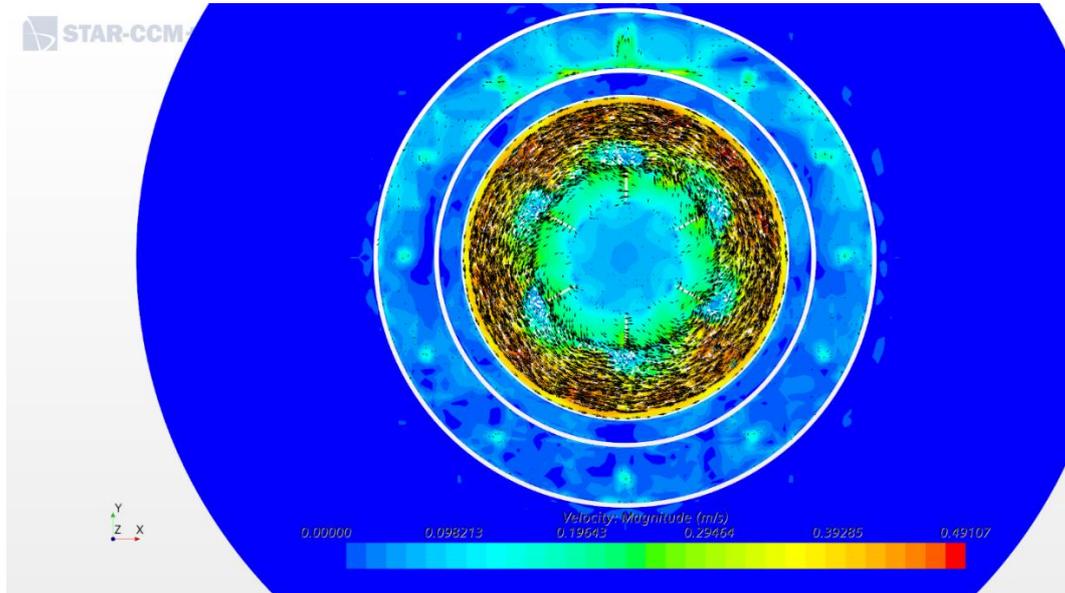


Ilustración 51: Campo de velocidades en sección horizontal a la altura de la turbina (bandaje cerrado)

En este otro gráfico, se ha realizado una sección horizontal a $\frac{3}{4}$ partes de la altura máxima del decantador, en donde se encuentran los cuatro deflectores instalados en el interior de la campana. La función que tienen estas estructuras es la de convertir la velocidad tangencial del fluido impresa por influencia de la turbina en velocidad normal, de tal forma que se evite la creación de vórtices y se aumente la agitación de la zona.

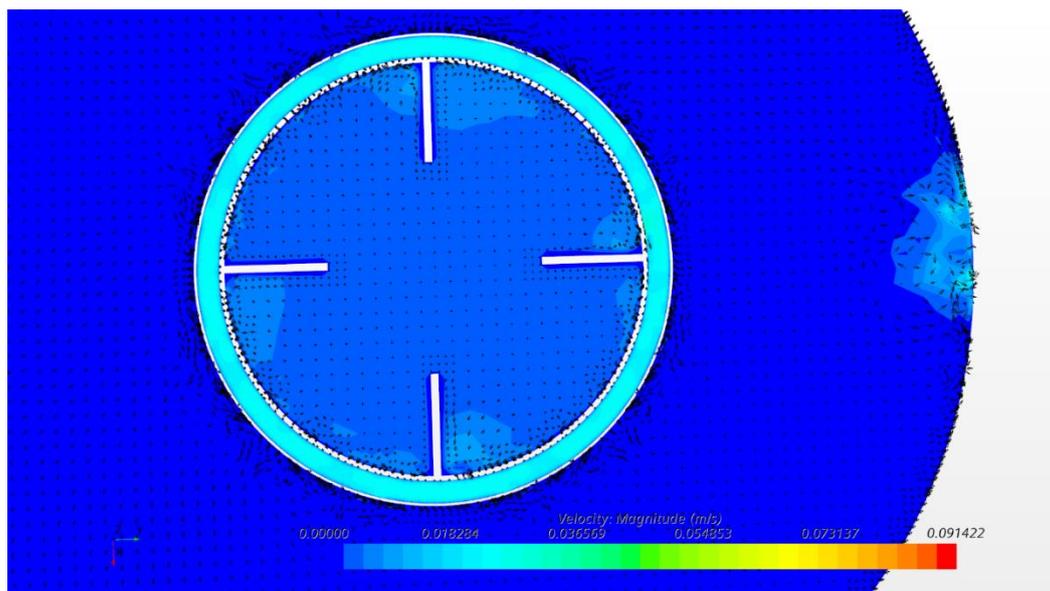


Ilustración 52: Campo de velocidades en sección horizontal de la parte superior del decantador (bandaje cerrado)

11.2.2. Posición bandaje 1 cm

Esta posición se corresponde con el bandaje abierto en su primera posición, dejando un mínimo espacio entre su parte inferior con la estructura interna del decantador, de forma que el agua impulsada por la turbina puede pasar a través de dicho espacio.

Al igual que en el análisis del modelo anterior, al estudiar en detalle el comportamiento hidráulico del decantador, se observa claramente la existencia de dos zonas claramente diferenciadas. En la siguiente imagen puede apreciarse una sección vertical del decantador que pasa por su parte central y que divide la tubería de entrada de agua bruta en dos mitades.

Por un lado, se encuentra la zona perimetral externa a la campana en la que las velocidades son muy bajas, estando en torno a 0,005 – 0,009 m/s, que son las requeridas en una región en la que se produce el proceso de sedimentación de partículas.

Por otro lado, está la zona interna de la campana, en la cual las velocidades son más elevadas, en torno a un orden de magnitud superiores a de la parte perimetral. Estas velocidades evitan que se produzca sedimentación en esta zona y permite una correcta recirculación y agitación de los flóculos.

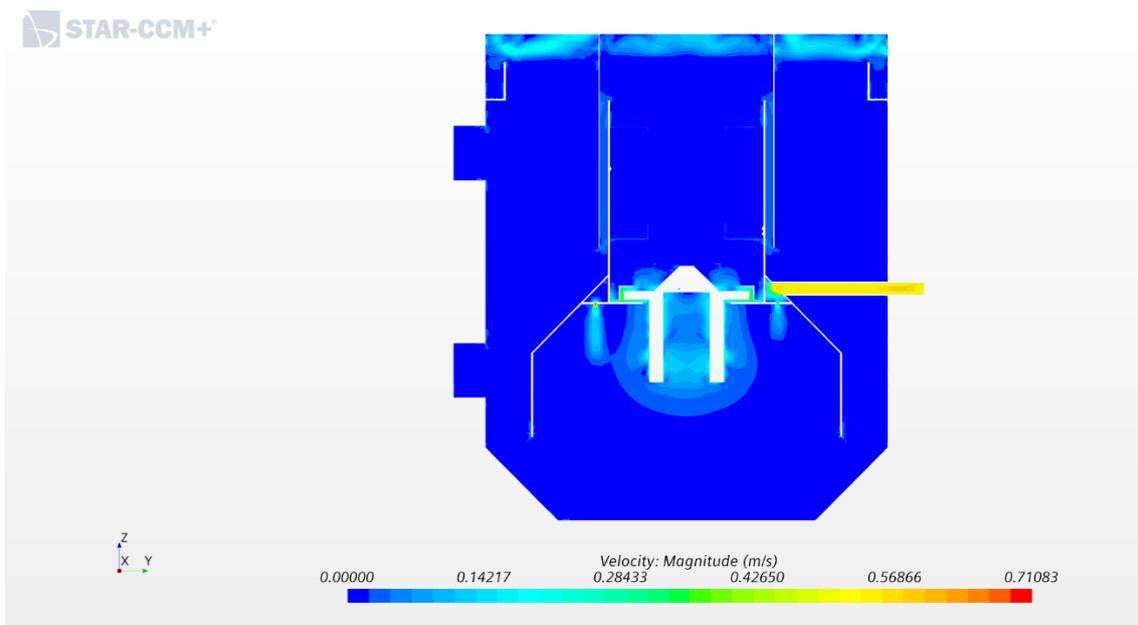


Ilustración 53: Campo de velocidades en el interior del decantador (bandaje a 1 cm)

En esta otra figura, se presentan los sentidos de flujo del agua en el interior del decantador, que se dibujan junto a las velocidades en escala de colores. Es posible apreciar el reparto de agua bruta a través de los orificios de la cámara tórica hacia la zona interior de la campana del decantador, los cuales dibujan un flujo prácticamente vertical hacia abajo.

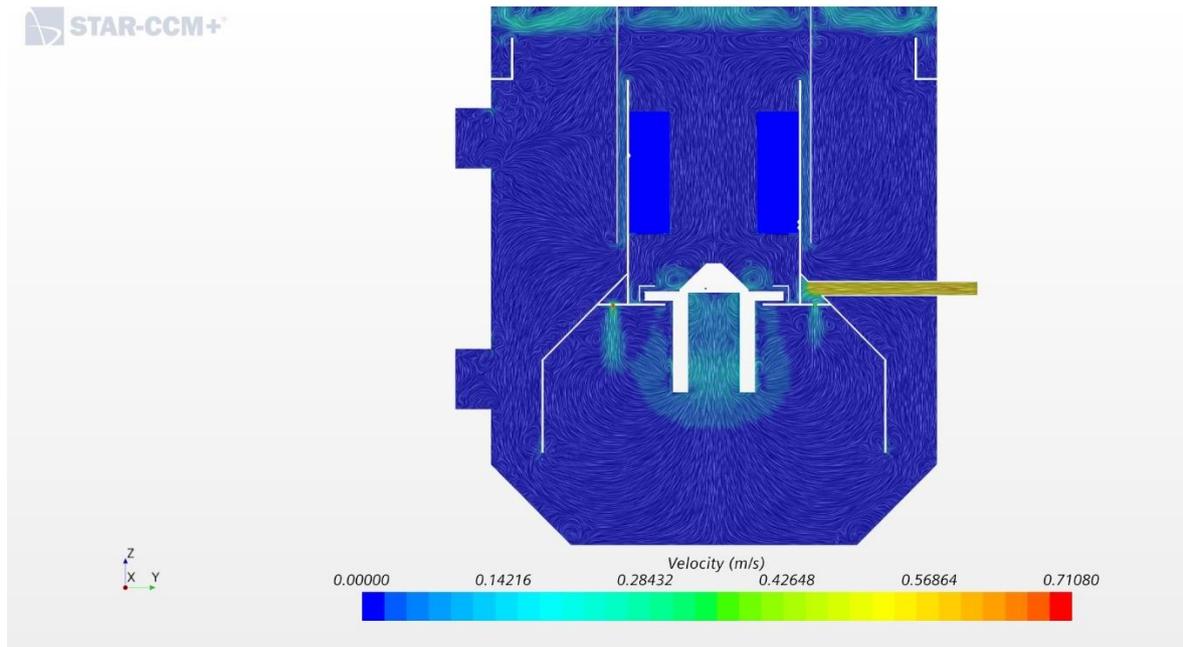


Ilustración 54: Sentidos de flujo del fluido en el interior del decantador (bandaje a 1 cm)

En cuanto a la turbina, tiene la función de impulsar el fluido hacia la parte superior del decantador a la vez que genera una agitación considerable en toda la parte interna de la campana. En la parte inferior se crean dos remolinos que rotan en sentidos opuestos por efecto del giro de la turbina.

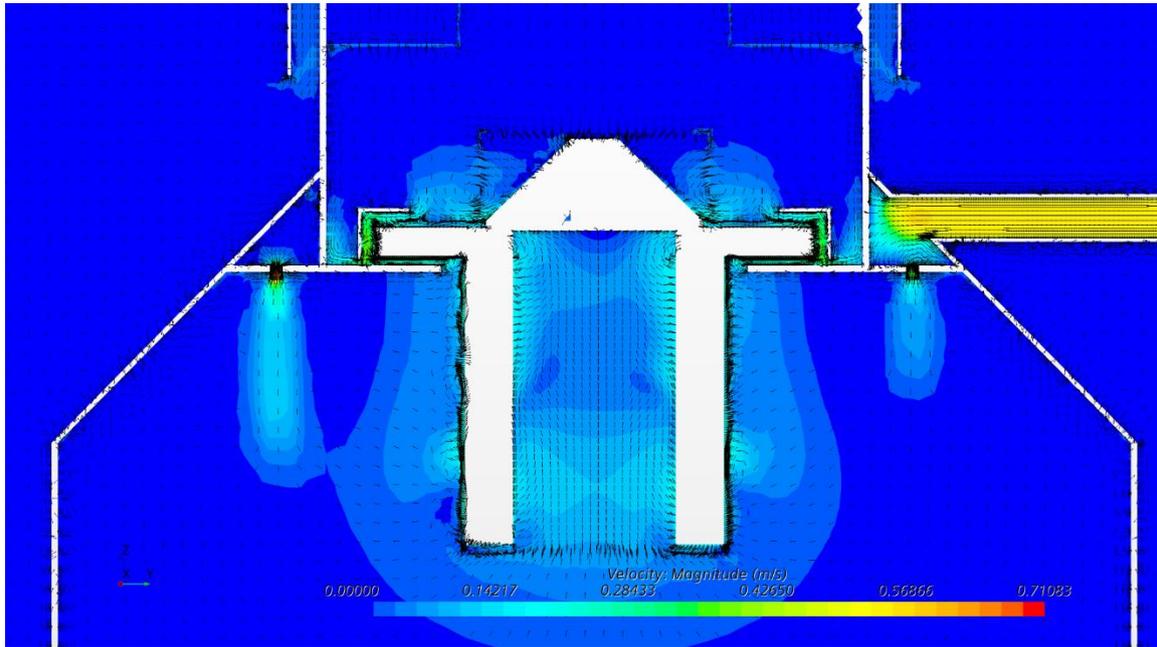


Ilustración 55: detalle del flujo en la zona de la turbina (bandaje a 1 cm)

En este caso, al estar el bandaje ínfimamente abierto, la recirculación de fluido y el paso hacia la parte superior se produce con dificultad. Aun así, es suficiente para eliminar la zona muerta que existía para el caso anterior en el que el bandaje se encontraba cerrado. Al abrir el bandaje se genera una corriente que arrastrará la posible acumulación fangos y sedimentos existentes en ese punto.

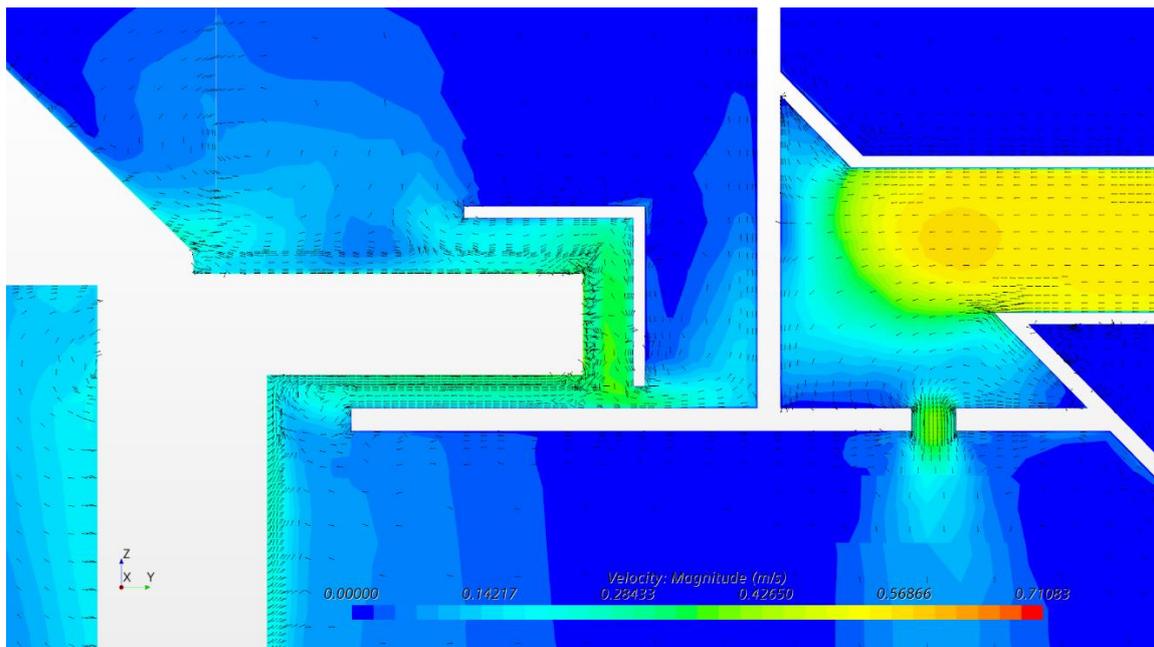


Ilustración 56: detalle del flujo en la zona del bandaje regulado a 1 cm

11.2.3. Posición bandaje 2 cm

Esta posición se corresponde con el bandaje parcialmente abierto encontrándose parcialmente libre el camino para el agua, que es impulsada por la zona superior del agitador.

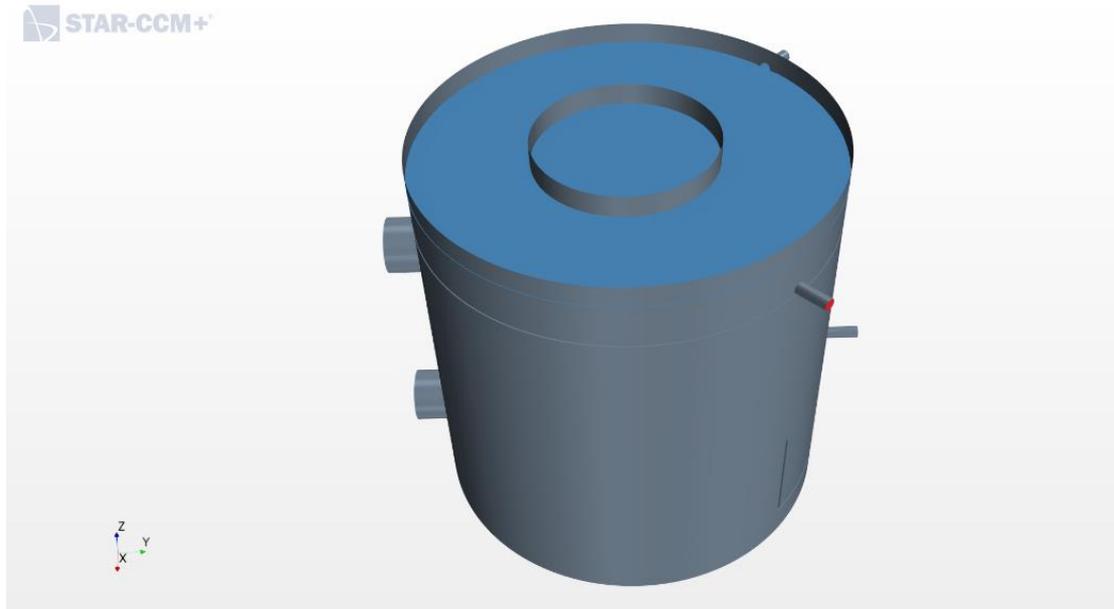


Ilustración 57: Decantador lleno de agua

Continuando con el guion anterior, al estudiar detalladamente el comportamiento hidráulico de este modelo del decantador, se comprueba que existen dos zonas claramente diferenciadas, como se aprecia en la siguiente imagen correspondiente a una sección vertical del decantador.

En la zona perimetral externa a la campana se presentan velocidades muy bajas, del orden de 6 mm/s, que son las esperadas para permitir que se produzca el proceso de sedimentación de partículas requerido para el buen funcionamiento del equipo.

En cuanto a la parte interna de la campana, las velocidades son más elevadas en esta zona comparándola con la zona perimetral, en torno a un orden de magnitud superiores. Estas velocidades evitan que se produzca sedimentación en esta área y permite la recirculación y agitación de los flóculos.

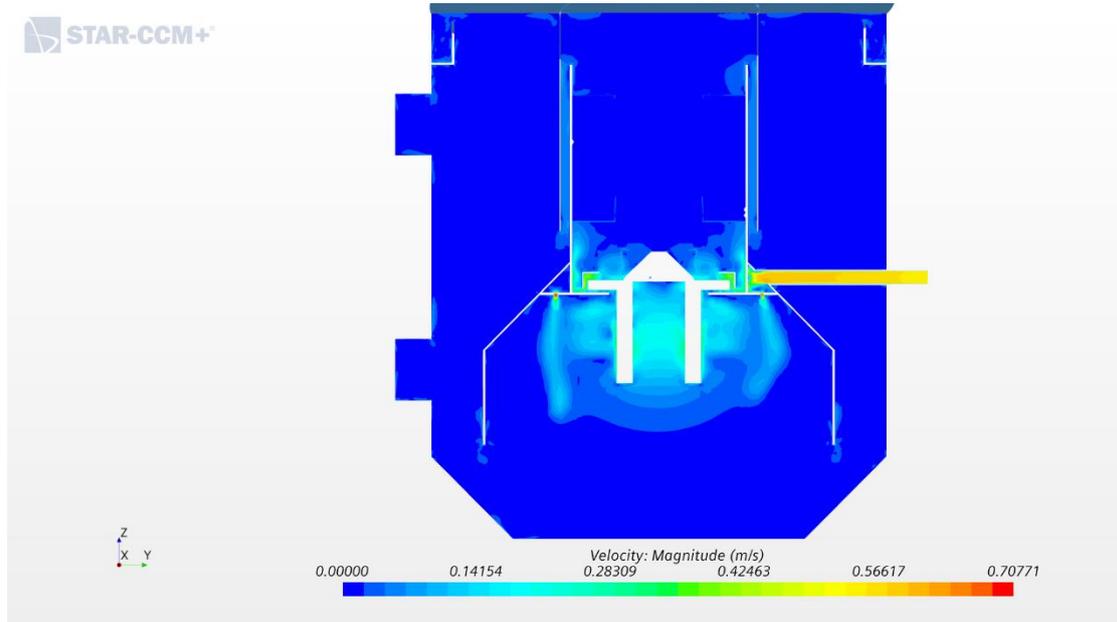


Ilustración 58: Campo de velocidades en el interior del decantador (bandaje a 2 cm)

En esta otra figura, se presentan los sentidos de flujo del agua en el interior del decantador dibujados junto a las velocidades en escala de colores tipo arcoíris. Es posible apreciar el reparto de agua bruta a través de los orificios de la cámara tórica hacia la zona interior de la campana del decantador, los cuales dibujan un flujo casi vertical y hacia abajo a excepción del orificio que se observa en el lado derecho de la imagen.

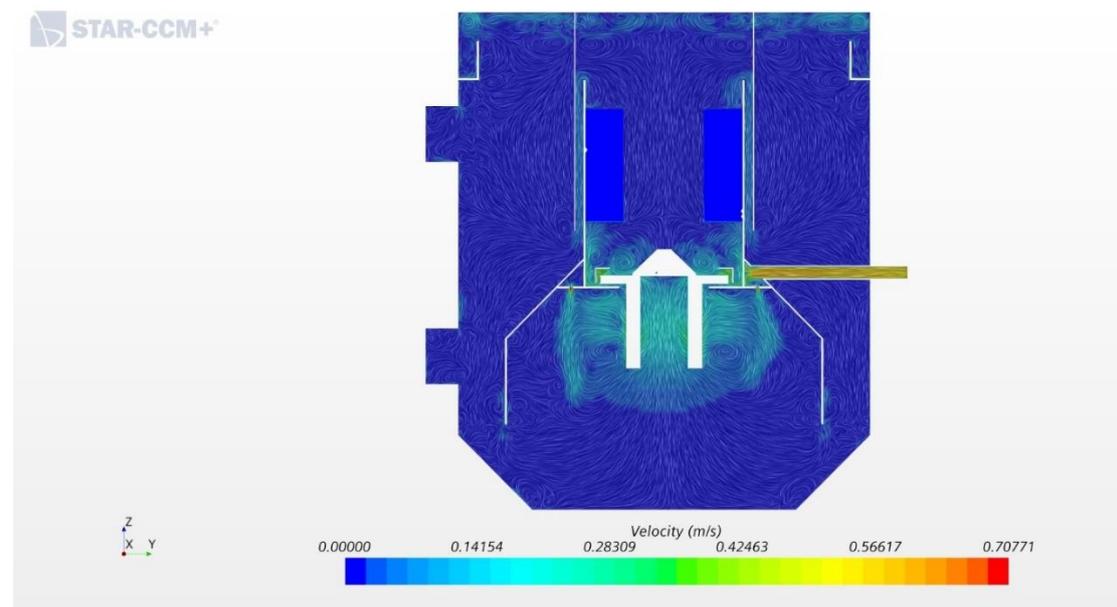


Ilustración 59: Sentidos de flujo del fluido en el interior del decantador (bandaje a 2 cm)

La turbina genera una agitación relevante en toda la zona interna de la campana (que aumenta según se eleva el bandaje), además de impulsar el fluido hacia la parte superior. En la zona interior de la campana se provocan dos remolinos girando en sentidos opuestos uno a cada lado del agitador. Adicionalmente, al igual que en el diseño anterior, se aprecia cómo el orificio de reparto de la parte derecha de la imagen introduce el agua al interior de la campana con cierta componente horizontal, a diferencia del resto de orificios.

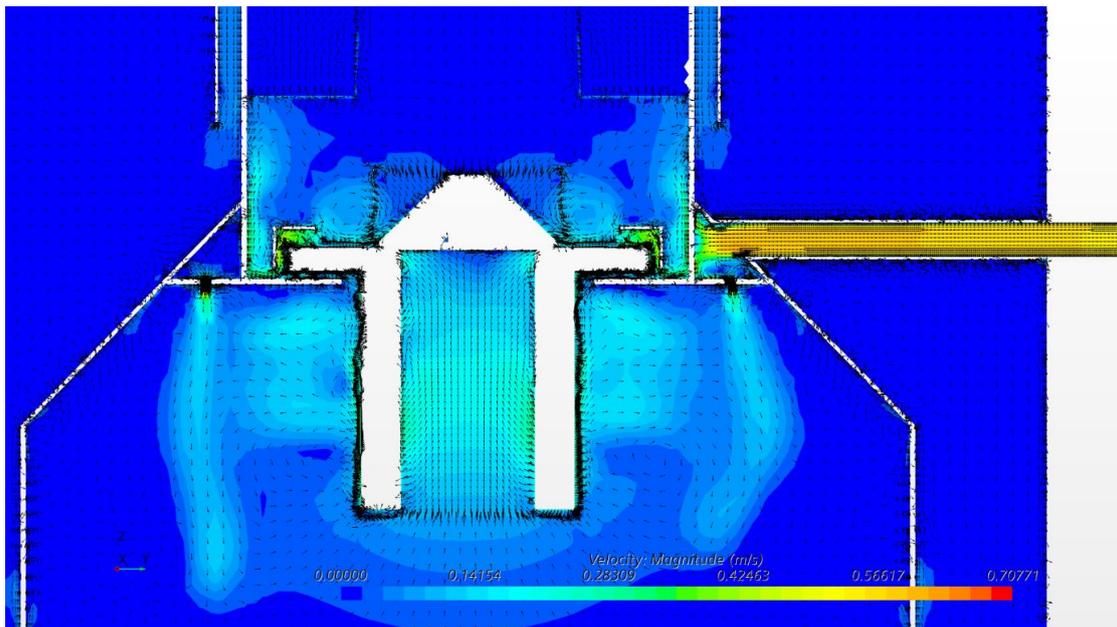


Ilustración 60: detalle del flujo en la zona de la turbina (bandaje a 2 cm)

En este caso y al igual que en el diseño anterior, al estar el bandaje ligeramente abierto, se puede comprobar cómo se permite el paso de parte del flujo por el volumen comprendido entre el bandaje y la pared de la campana, a pesar de que la posición del bandaje lo limita en gran medida. El agua es impulsada contra la parte perimetral de la campana donde se defleca y cambia su dirección.

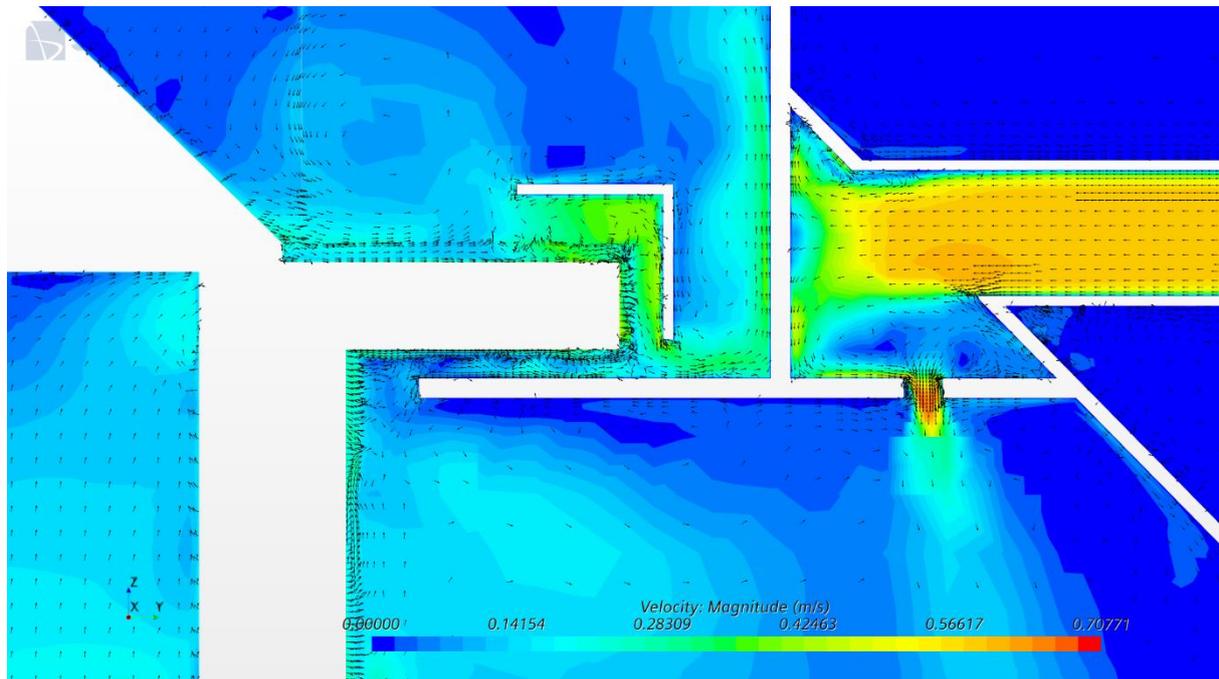


Ilustración 61: detalle del flujo en la zona del bandaje regulado a 2 cm

11.2.4. Posición bandaje 3 cm

Esta posición se corresponde con el bandaje un poco más debajo de media altura, encontrándose parcialmente libre el camino para el agua, que es impulsada por la zona superior del agitador.

Al igual que en la geometría anterior, al estudiar en detalle el comportamiento hidrodinámico de este modelo del decantador, se observa que existen dos zonas claramente diferenciadas, como se puede apreciar en la siguiente imagen correspondiente a una sección vertical del decantador.

Por una parte, en la zona perimetral externa a la campana se presentan velocidades muy bajas, del orden de 5 mm/s, que son las deseadas para permitir que se produzca la sedimentación de partículas.

Por otra, está la parte interna de la campana, en la cual las velocidades son más elevadas, en torno a un orden de magnitud de diferencia con la velocidad de la zona perimetral. Estas velocidades evitan que se produzca sedimentación en esta área y permite la recirculación y agitación de los flóculos.

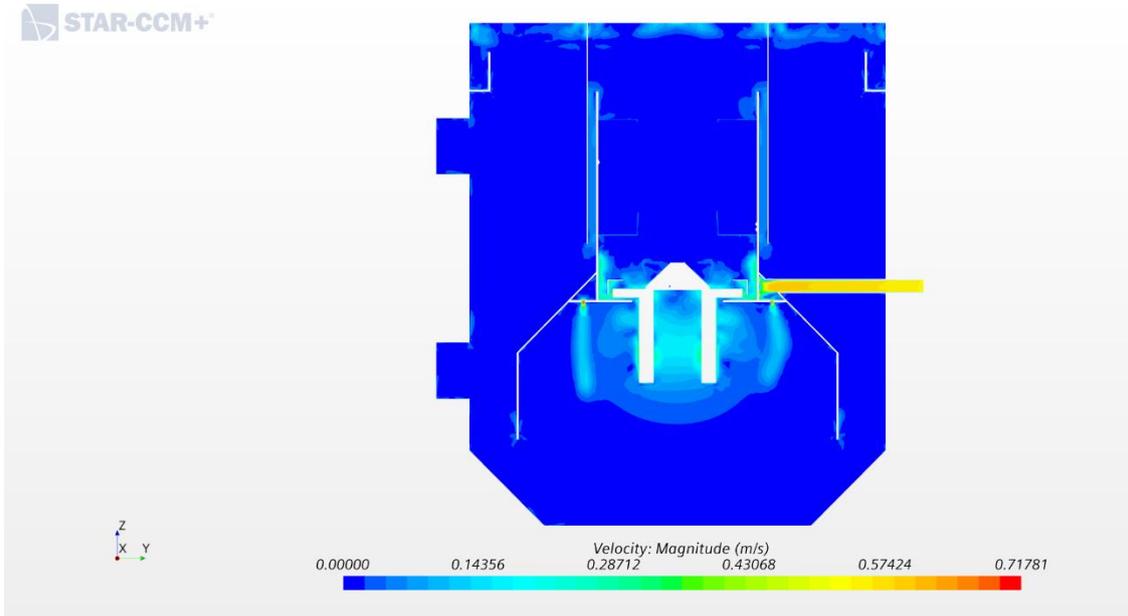


Ilustración 62: Campo de velocidades (a) en el interior del decantador (bandaje a 3 cm)

En esta otra ilustración, se presenta otra sección, perpendicular a la anterior. Es posible apreciar el reparto de agua bruta a través de los orificios de la cámara tórica hacia la zona interior de la campana del decantador, los cuales dibujan un flujo prácticamente vertical hacia abajo.

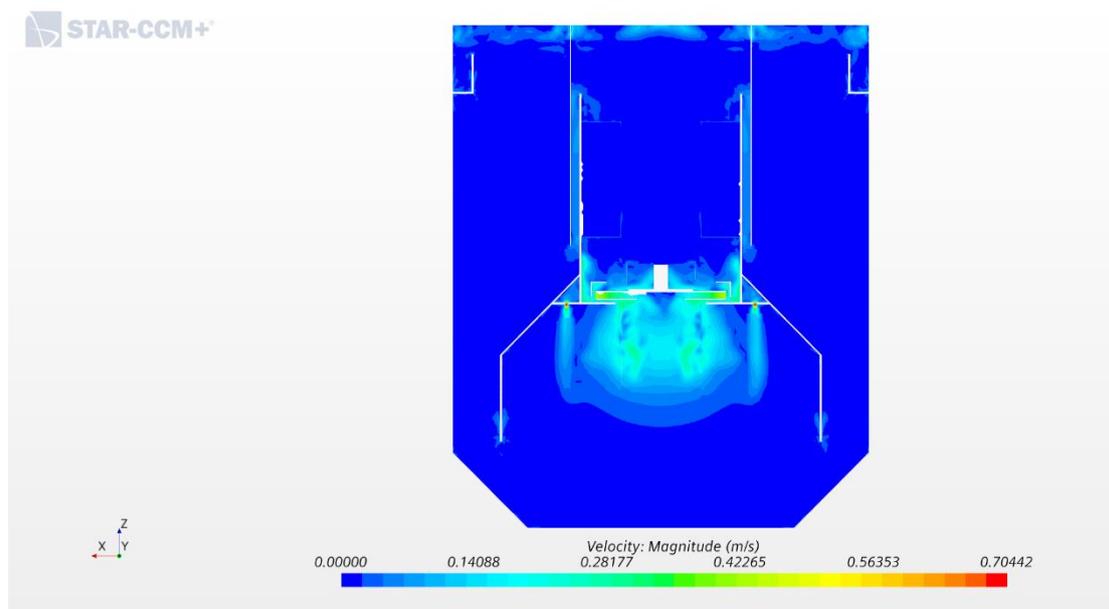


Ilustración 63: Campo de velocidades (b) en el interior del decantador (bandaje a 3 cm)

La turbina, por su parte, genera una agitación importante en toda la zona interna de la campana (que aumenta según se eleva el bandaje), además de impulsar el fluido hacia la parte superior. En la cámara principal de la campana se provocan dos remolinos girando en sentidos opuestos uno a cada lado del agitador. Además, se observa claramente, al igual que en el diseño anterior, cómo el orificio de reparto de la parte derecha de la imagen infunde el agua al interior de la campana con cierta componente horizontal, a diferencia del resto de orificios.

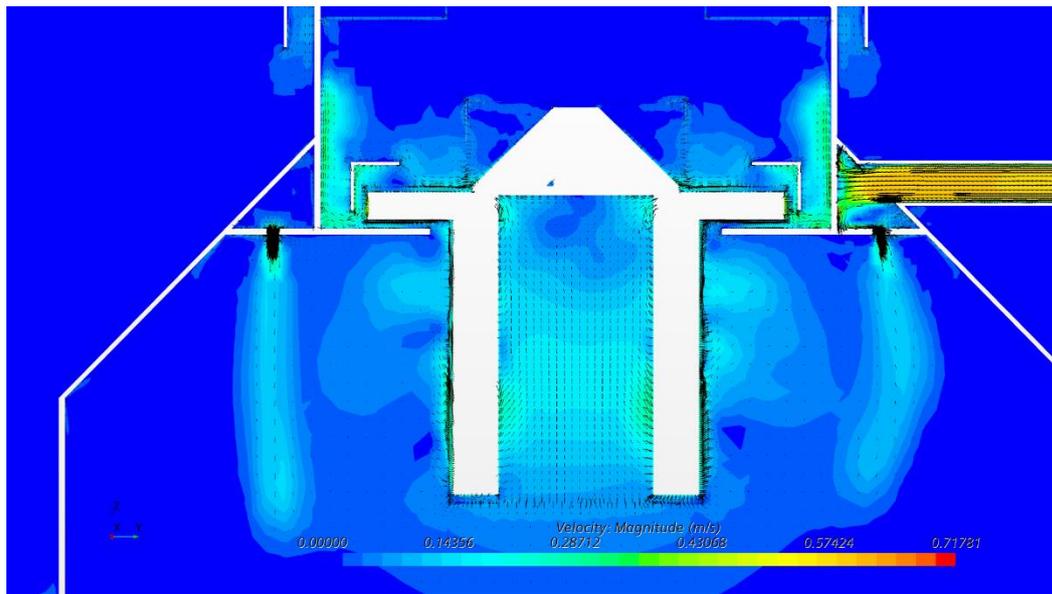


Ilustración 64: detalle del flujo en la zona de la turbina (bandaje a 3 cm)

En este caso, al estar el bandaje semiabierto, se puede apreciar cómo se permite el paso del flujo entre el bandaje regulable y la pared de la campana oponiendo cierta resistencia el bandaje al mismo. El agua es impulsada por la turbina contra la parte perimetral de la campana donde se defleca y cambia su dirección.

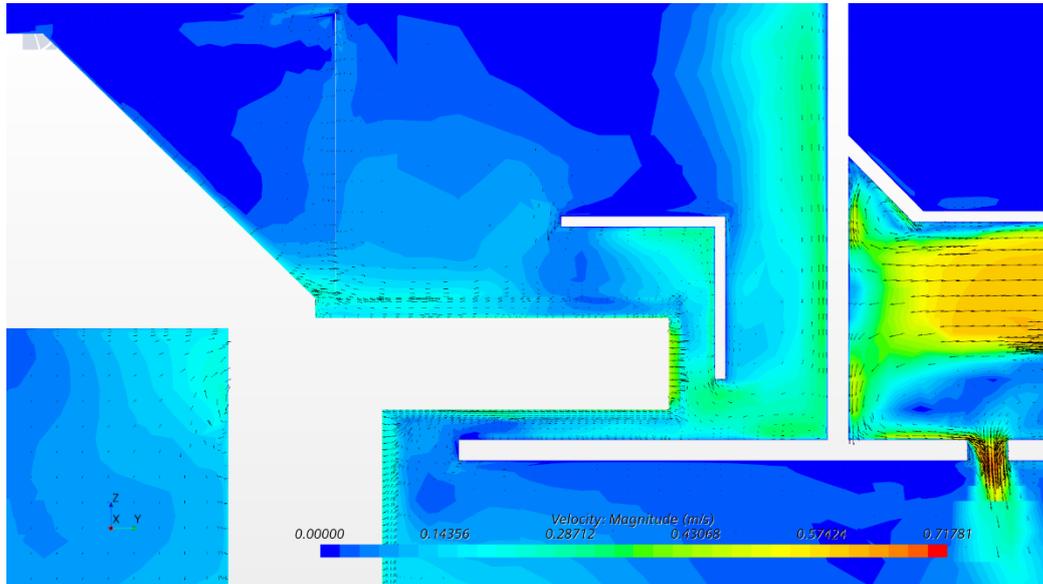


Ilustración 65: detalle del flujo en la zona del bandaje regulado a 3 cm

Se muestran ahora líneas de flujo llamadas streamlines que salen desde la parte interior de la campana a través de la camisa cilíndrica situada en la parte superior de la misma. Del flujo de fluido proveniente del interior de la campana, la gran mayoría se dirige hacia la parte inferior para volver a recircularse mientras que una pequeña parte va subiendo poco a poco hasta llegar a los vertederos superiores y abandonar el equipo por la tubería de salida.

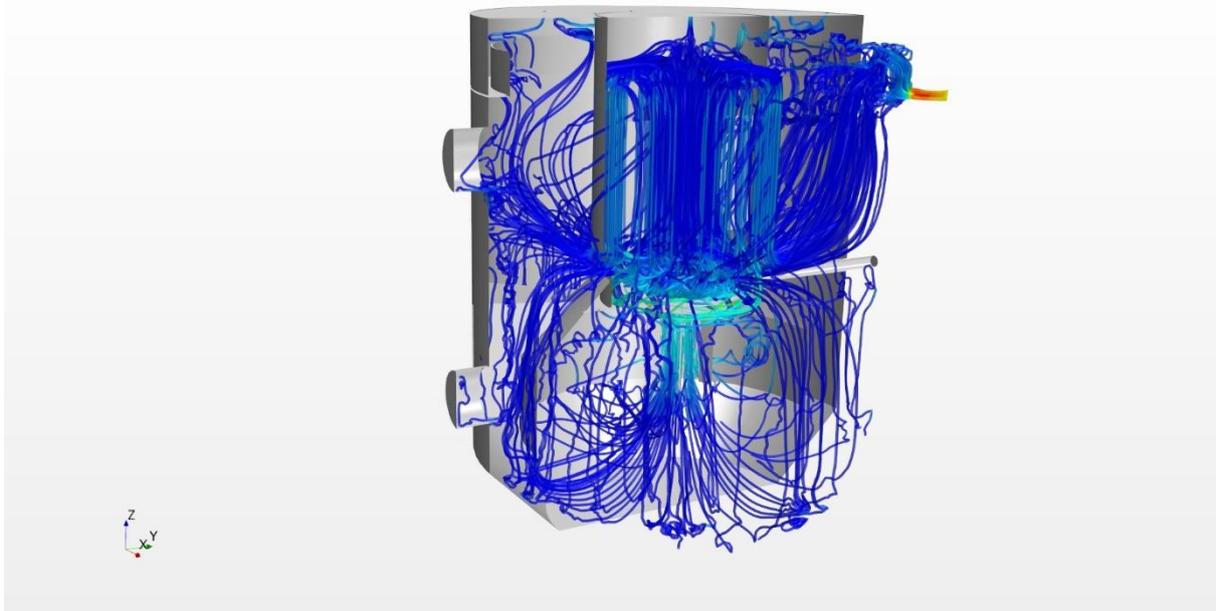


Ilustración 66: líneas de flujo desde el interior de la campana (bandaje a 3 cm)

11.2.5. Posición bandaje 4 cm

Esta posición se corresponde con el bandaje a media altura, encontrándose parcialmente libre el camino para el agua que es impulsada por la zona superior del agitador.

Al estudiar en detalle el comportamiento hidrodinámico del decantador, se distinguen dos zonas claramente diferenciadas, como se puede observar en la siguiente imagen correspondiente a una sección vertical del decantador que lo divide por la mitad.

Por un lado, está la zona perimetral externa a la campana en la que las velocidades son muy bajas, del orden de 0,006 m/s, que son las esperadas en una zona en la que se produce la sedimentación de partículas.

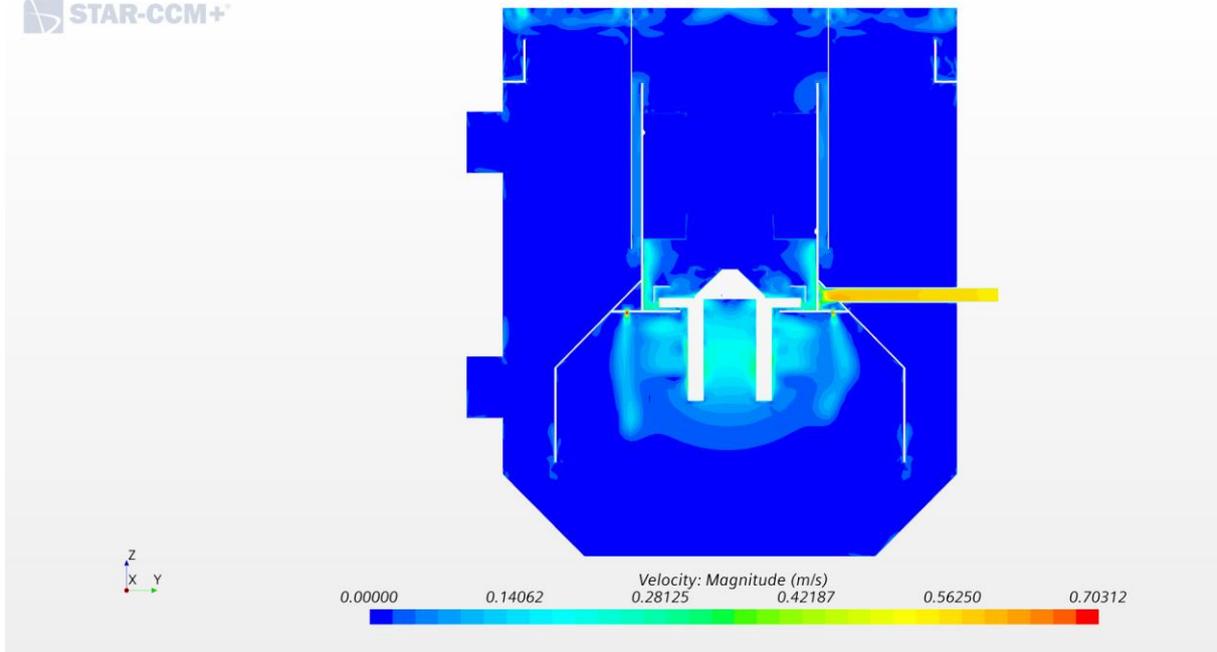


Ilustración 67: Campo de velocidades en el interior del decantador (bandaje a 4 cm)

Por otro lado, está la zona interna de la campana, en la cual las velocidades son, en torno a un orden de magnitud superiores a las de la parte perimetral. Estas velocidades evitan que se produzca sedimentación en esta zona y permite la recirculación y agitación de los flóculos.

En esta otra imagen, se tienen los sentidos de flujo del agua en el interior del decantador trazados junto a las velocidades en escala de colores. Es posible apreciar el reparto de agua bruta a través de los orificios de la cámara tórica hacia la zona interior de la campana del decantador, los cuales dibujan un flujo prácticamente vertical hacia abajo.

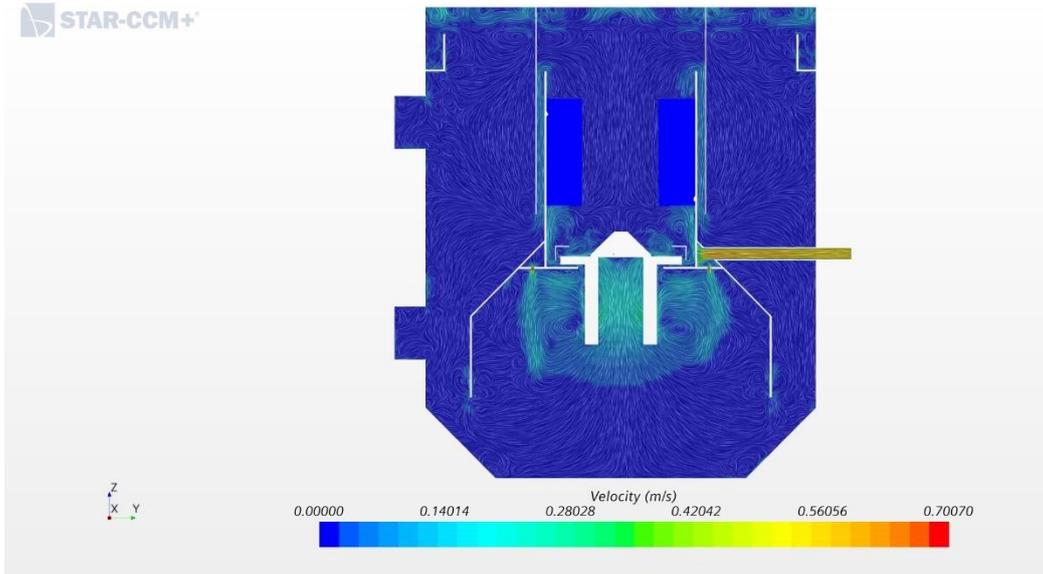


Ilustración 68: Sentidos de flujo del fluido en el interior del decantador (bandaje a 4 cm)

La turbina, por otro lado, genera una agitación importante en toda la parte interna de la campana (la cual es mayor cuanto más arriba se encuentra el bandaje), además de impulsar el fluido hacia la parte superior. En la cámara principal de la campana se provocan dos remolinos girando en sentidos opuestos uno a cada lado del agitador. Además, como se ha descrito previamente, se puede apreciar cómo el orificio de reparto de la parte derecha de la imagen infunde el agua al interior de la campana con cierta componente horizontal, a diferencia del resto de orificios de los que sale el agua prácticamente vertical.

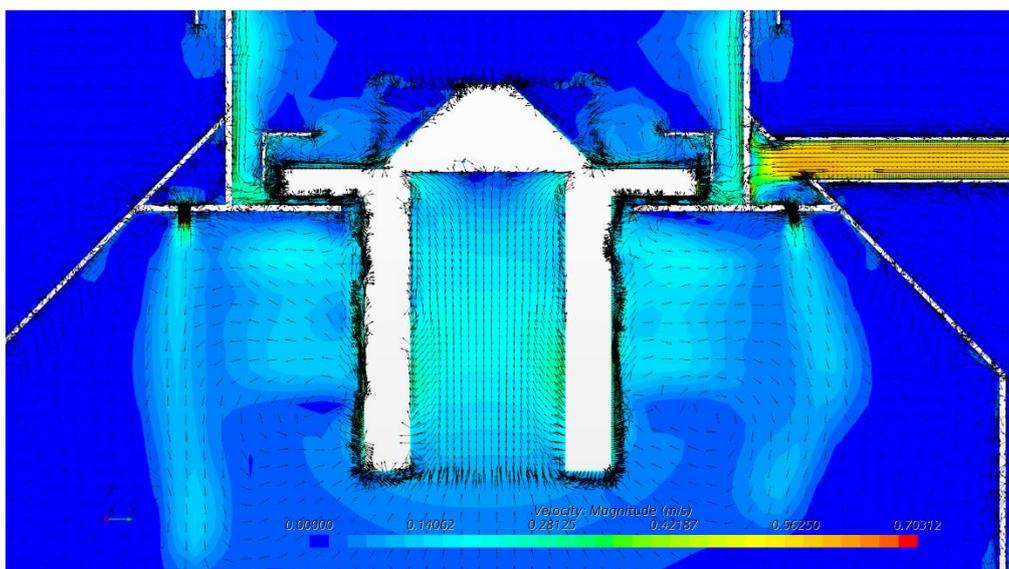


Ilustración 69: detalle del flujo en la zona de la turbina (bandaje a 4 cm)

En este caso, al estar el bandaje semiabierto, se puede comprobar cómo se permite el paso del flujo con cierta resistencia por el volumen comprendido entre el bandaje y la pared de la campana. El agua es impulsada contra la pared perimetral de la campana donde se deflecta y cambia su dirección.

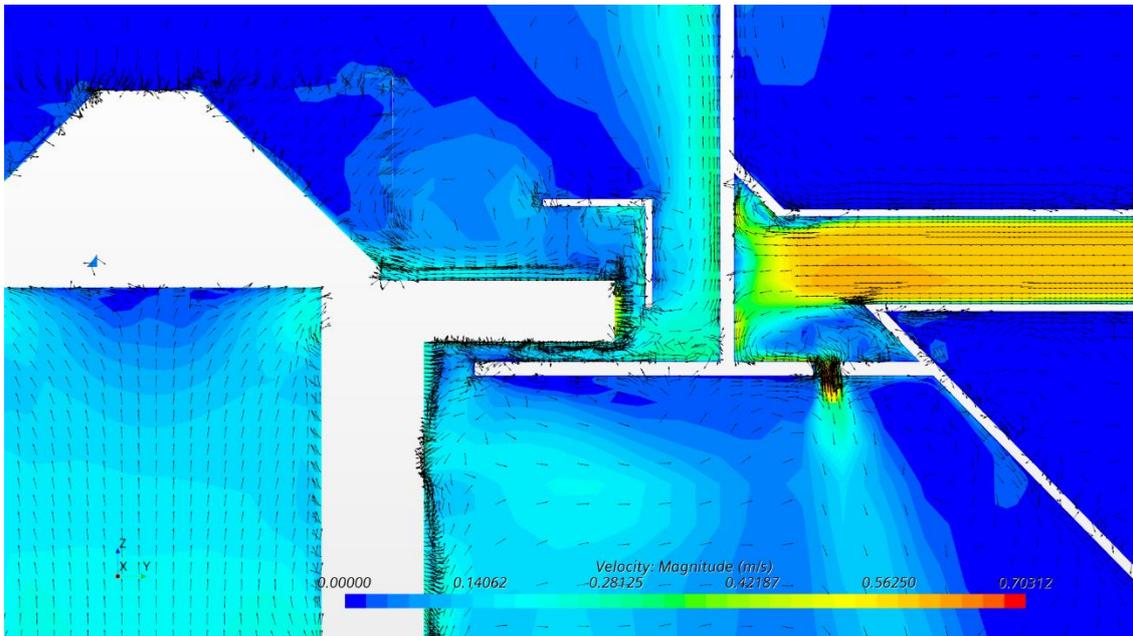


Ilustración 70: detalle del flujo en la zona del bandaje regulado a 4 cm

Se muestra, a continuación, una sección horizontal practicada justo por debajo de la altura de los orificios de reparto de agua bruta. En ella se puede observar claramente diferenciadas las zonas perimetral (en color azul intenso homogéneo, sinónimo de velocidades bajas) e interior de la campana en donde se localiza la turbina. Los orificios de la cámara de reparto por donde se infunde agua a la zona interna de la campana se intuyen como pequeños círculos de color rojo intenso, en donde se dan velocidades elevadas. Como ya se ha mencionado con anterioridad, la disposición espacial de los 12 orificios de reparto junto a que todos cuentan con el mismo diámetro, hace que haya variaciones de velocidad entre ellos.

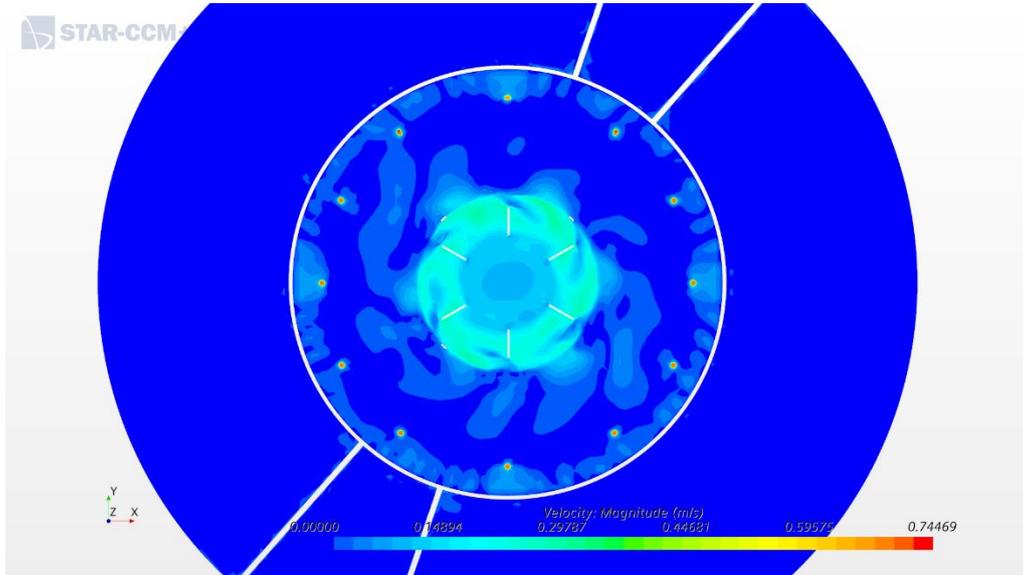


Ilustración 71: Campo de velocidades en sección horizontal por la zona de la turbina (bandaje a 6 cm)

Además, esta sección permite contemplar en corte las seis paletas de zona de la turbina que actúa como agitador. Se adjunta otra figura en la que se puede apreciar la turbina real desmontada con el foco en la zona de las paletas agitadoras frente al modelo generado en el software a modo de comparación y para mostrar la fidelidad de la geometría confeccionada.



Ilustración 72: Turbina real (izquierda), modelo 3D generado (derecha)

11.2.6. Posición bandaje 5 cm

Esta posición se corresponde con el bandaje semiabierto, encontrándose parcialmente libre el camino para el agua que es impulsada por la zona superior del agitador.

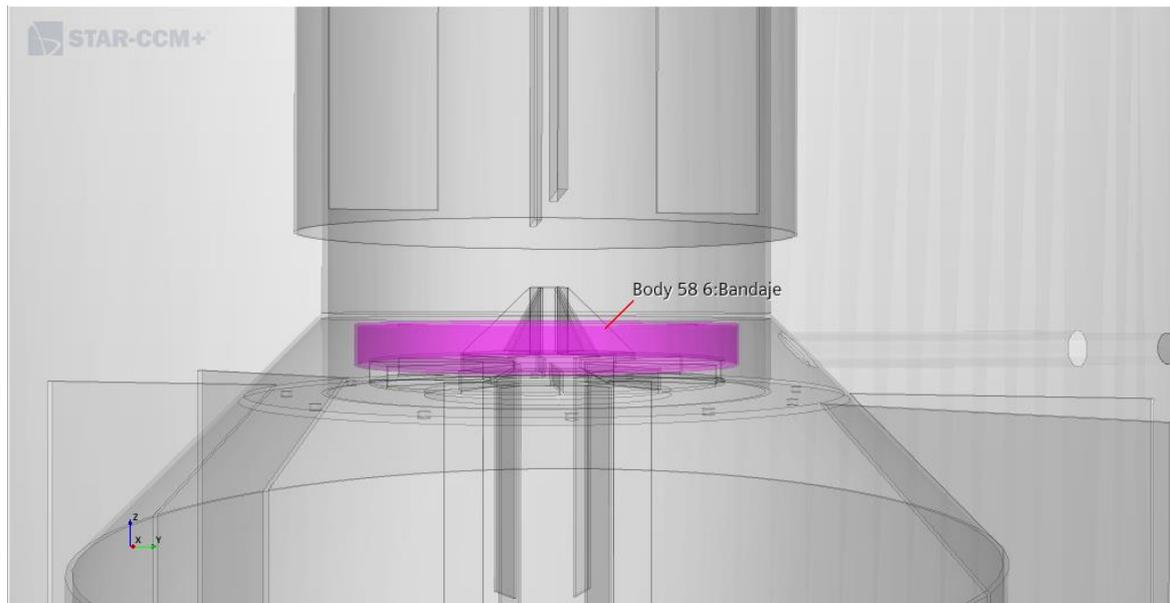


Ilustración 73: Posición del bandaje (marcado en color morado) en el interior del decantador

Al analizar el comportamiento hidráulico del decantador, se documenta la existencia de dos zonas claramente diferenciadas, como se puede apreciar en la imagen siguiente, correspondiente a una sección vertical del decantador que divide la conducción de entrada de agua bruta en dos mitades. Si bien es cierto que este modelo es en el cual se han ejecutado un menor número de iteraciones, y de ahí, la menor influencia de la turbina y agitación.

Tal y como ocurre en el resto de modelos, en la zona perimetral externa a la campana se presentan velocidades muy bajas, del orden de 5 mm/s, que son las deseadas para una zona en la que ocurre la sedimentación de partículas.

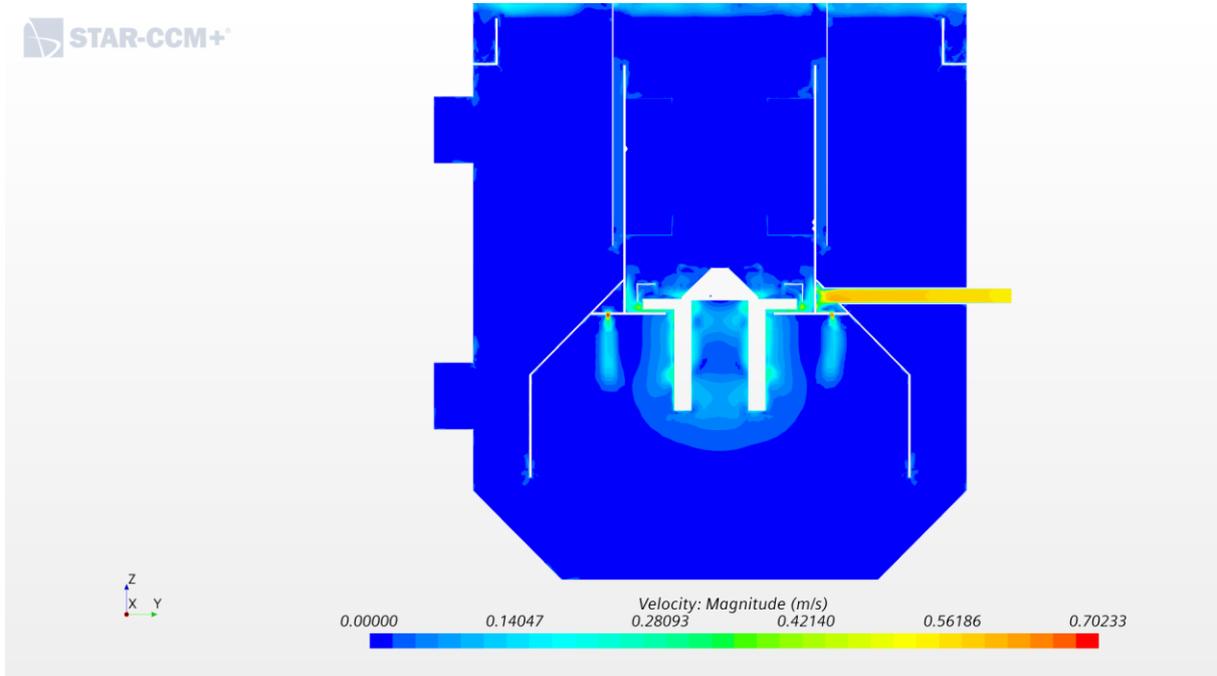


Ilustración 74: Campo de velocidades en el interior del decantador (bandaje a 5 cm)

En cuanto a la parte interna de la campana, las velocidades existentes son más elevadas que en la zona perimetral. Estas velocidades evitan que sedimenten partículas en esta zona a la par que se permite la recirculación y agitación de los flóculos.

En la imagen adjunta a continuación, se dibujan los sentidos de flujo del agua en el interior del decantador junto a las velocidades en escala de colores tipo arcoíris. Es posible contemplar el reparto de agua bruta a través de los orificios de la cámara tórica hacia la zona interior de la campana del decantador, los cuales dibujan un flujo en sentido vertical.

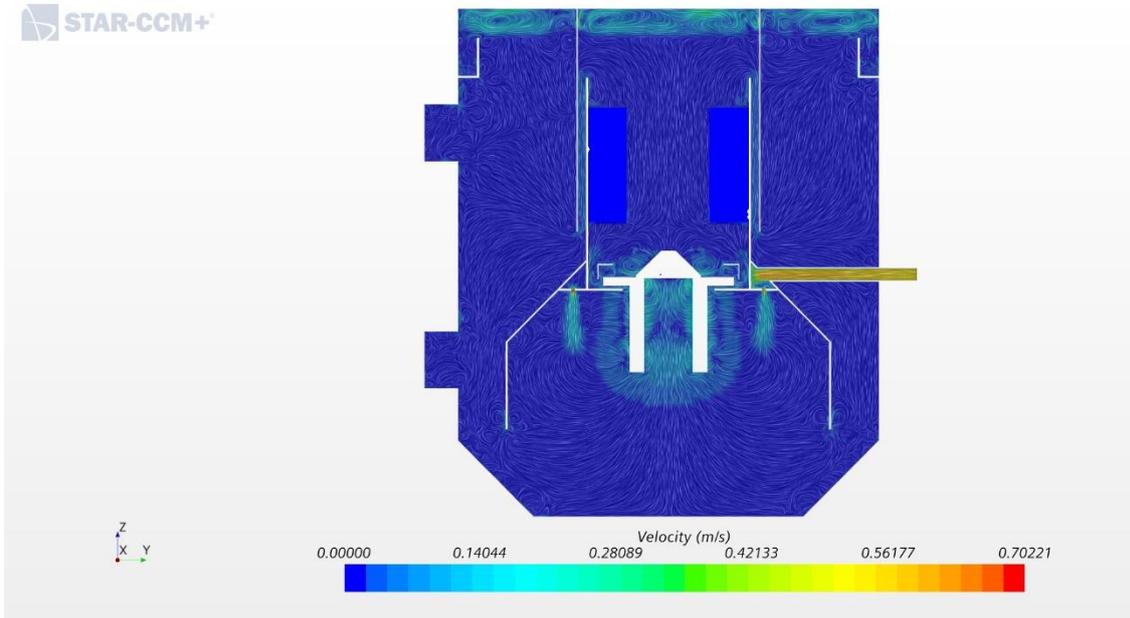


Ilustración 75: Sentidos de flujo del fluido en el interior del decantador (bandaje a 5 cm)

Al respecto de la turbina, esta genera una agitación relevante en toda la zona interna de la campana (que se incrementa con la altura del bandaje), además de impulsar el agua hacia la parte superior. En la cámara principal de la campana se generan dos remolinos girando en sentidos opuestos uno a cada lado del agitador.

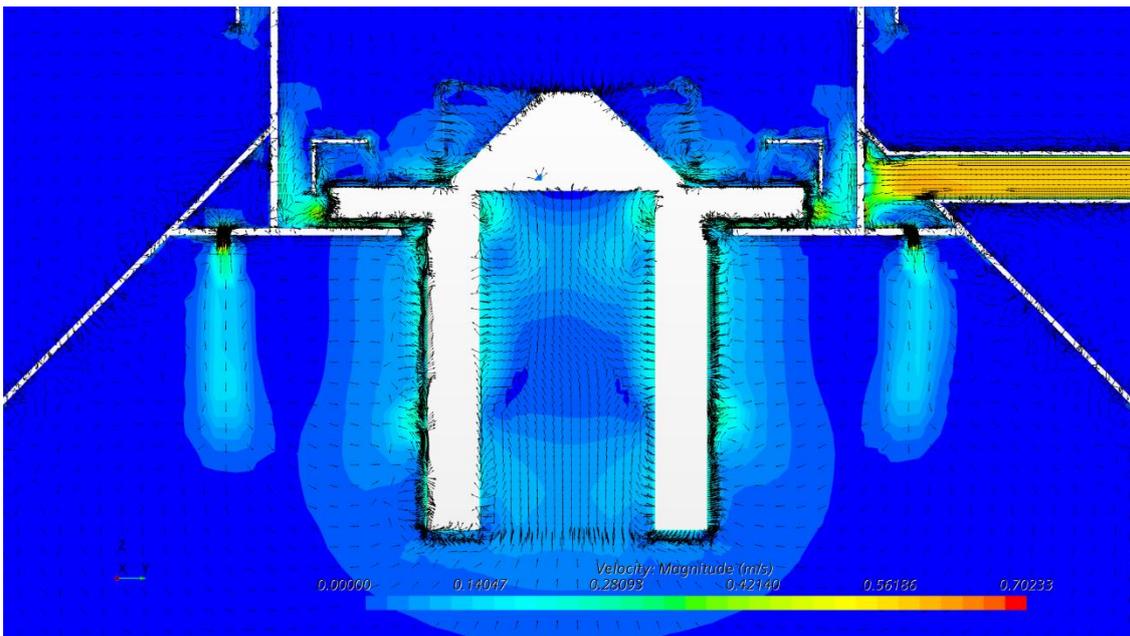


Ilustración 76: detalle del flujo en la zona de la turbina (bandaje a 5 cm)

En este caso, al estar el bandaje parcialmente abierto, se puede comprobar cómo se permite el paso del flujo por el volumen comprendido entre el bandaje y la pared de la campana. El agua es impulsada contra la parte perimetral de la campana donde se deflecta y cambia su dirección.

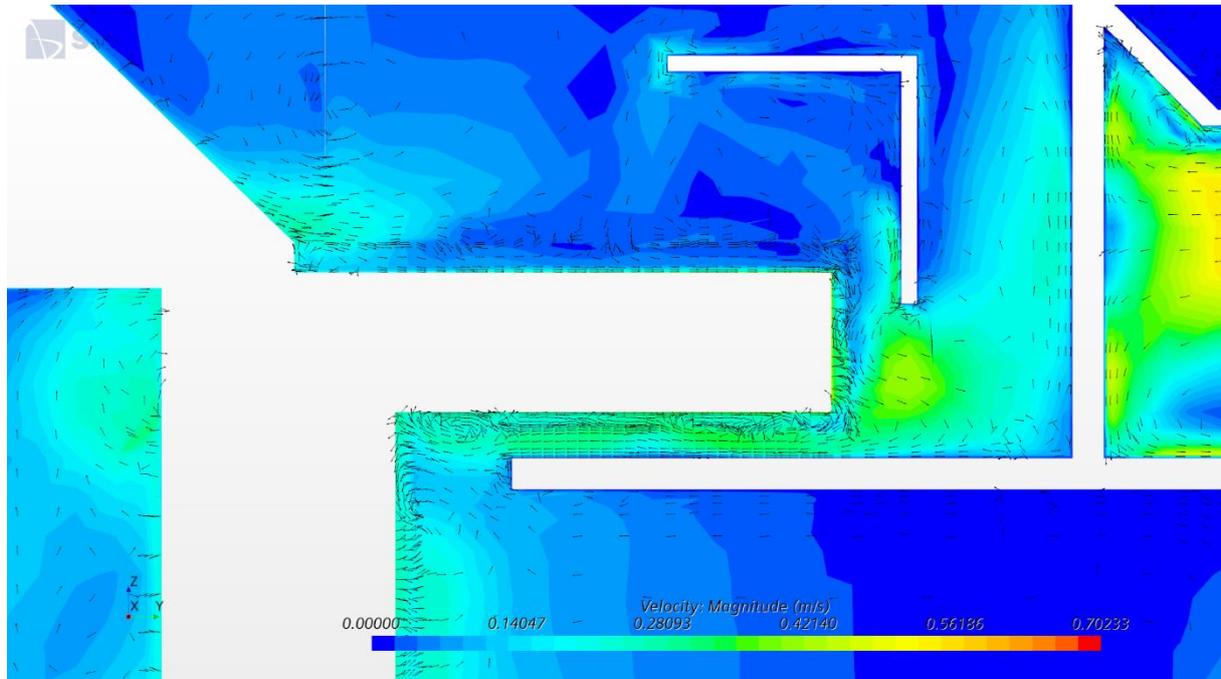


Ilustración 77: detalle del flujo en la zona del bandaje regulado a 5 cm

11.2.7. Posición bandaje 6 cm

Esta posición se corresponde con el bandaje abierto, estando parcialmente libre el camino para el agua que es impulsada por la zona superior del agitador.

Al estudiar en detalle el comportamiento hidrodinámico del decantador, se comprueba la existencia de dos zonas claramente diferenciadas, como se puede apreciar en la siguiente imagen correspondiente a una sección vertical del decantador.

Por un lado, en la zona perimetral externa a la campana se presentan velocidades muy bajas, del orden de mm/s, que son las esperadas para facilitar la sedimentación de partículas.

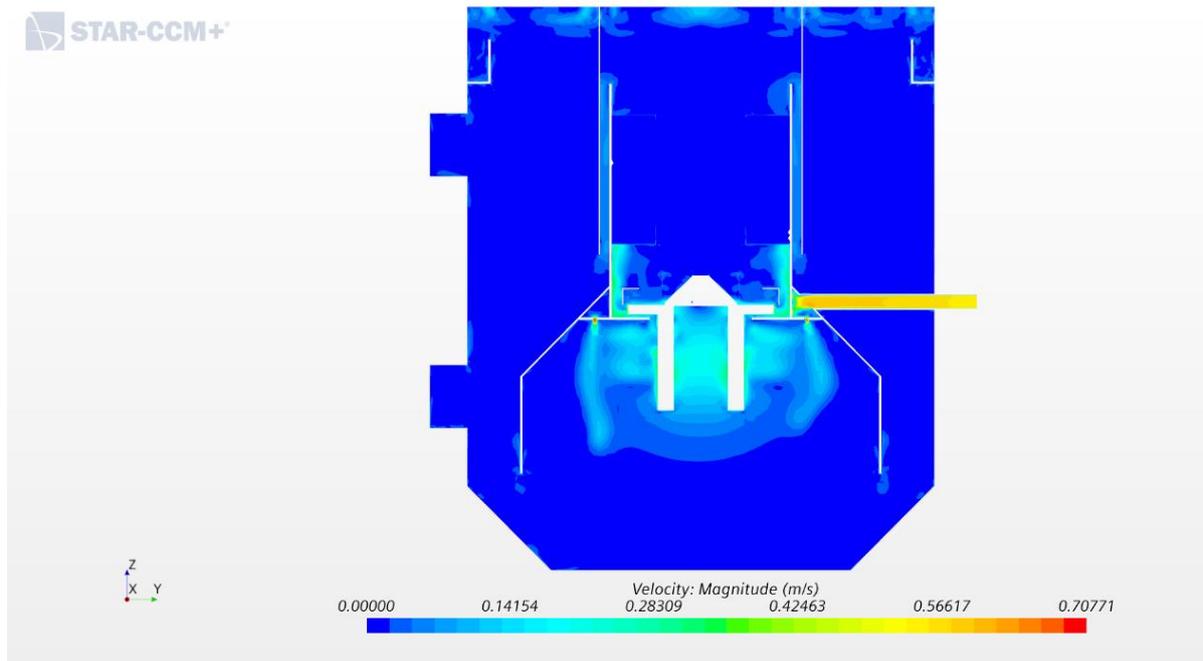


Ilustración 78: Campo de velocidades en el interior del decantador (bandaje a 6 cm)

Por otro, está la parte interna de la campana, en la cual las velocidades son superiores, en torno a un orden de magnitud a la velocidad de la zona perimetral. Estas velocidades evitan que se produzca sedimentación en esta zona y permite la recirculación y agitación de los flóculos.

En esta otra imagen, se adjuntan los sentidos de flujo del agua en el interior del decantador dibujados junto a las velocidades en escala de colores. Es posible observar el reparto de agua bruta a través de los orificios de la cámara tórica hacia la zona interior de la campana del decantador, los cuales dibujan un flujo casi vertical hacia abajo.

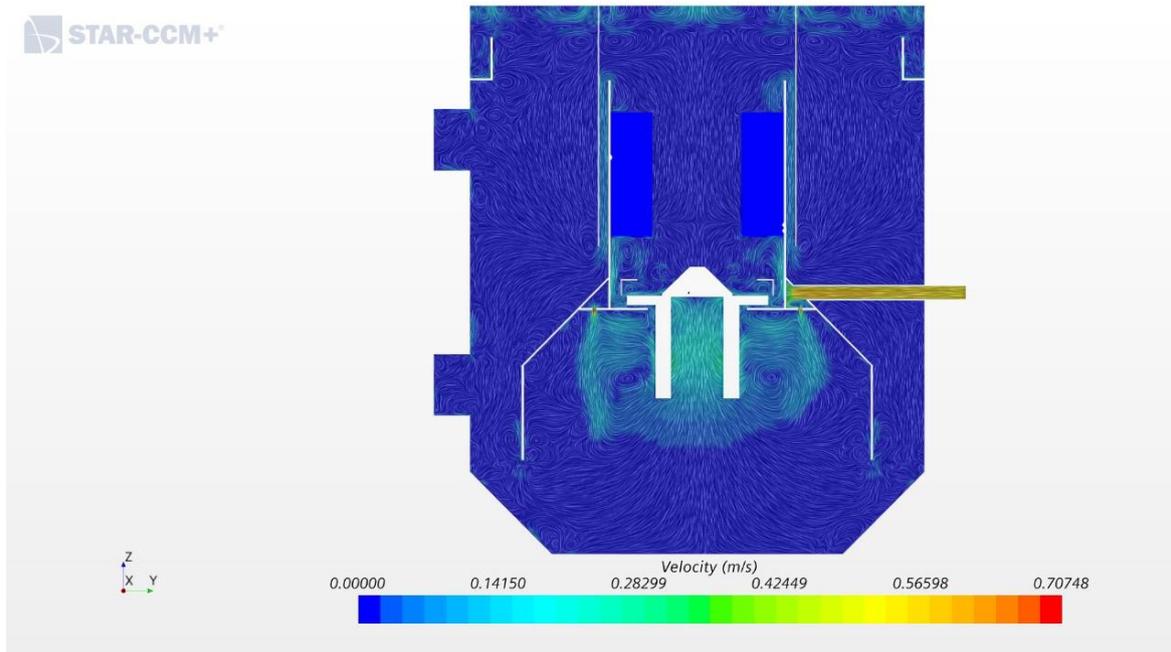


Ilustración 79: Sentidos de flujo del fluido en el interior del decantador (bandaje a 6 cm)

La turbina, por otro lado, genera una agitación importante en toda la parte interna de la campana (mayor cuanto más elevado se encuentra el bandaje), además de impulsar el fluido hacia la parte superior. En la cámara principal de la campana se generan dos remolinos girando en sentidos opuestos uno a cada lado del agitador. Además, como se ha mencionado previamente, se puede observar cómo el orificio de reparto de la parte derecha de la imagen infunde el agua al interior de la campana con cierta componente horizontal, a diferencia del resto de orificios.

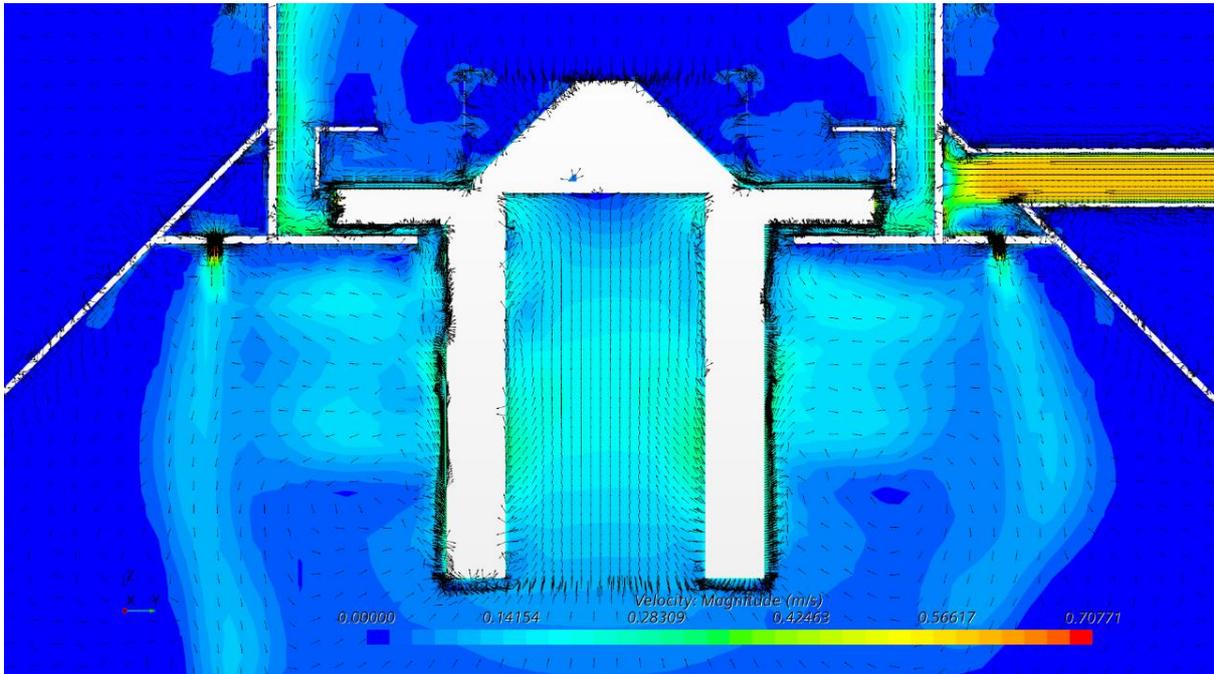


Ilustración 80: detalle del flujo en la zona de la turbina (bandaje a 6 cm)

En este caso, al estar el bandaje abierto, se puede apreciar cómo se permite el paso del flujo entre el bandaje y la pared de la campana. El agua es impulsada contra la parte perimetral de la campana donde se deflecta y cambia su dirección.

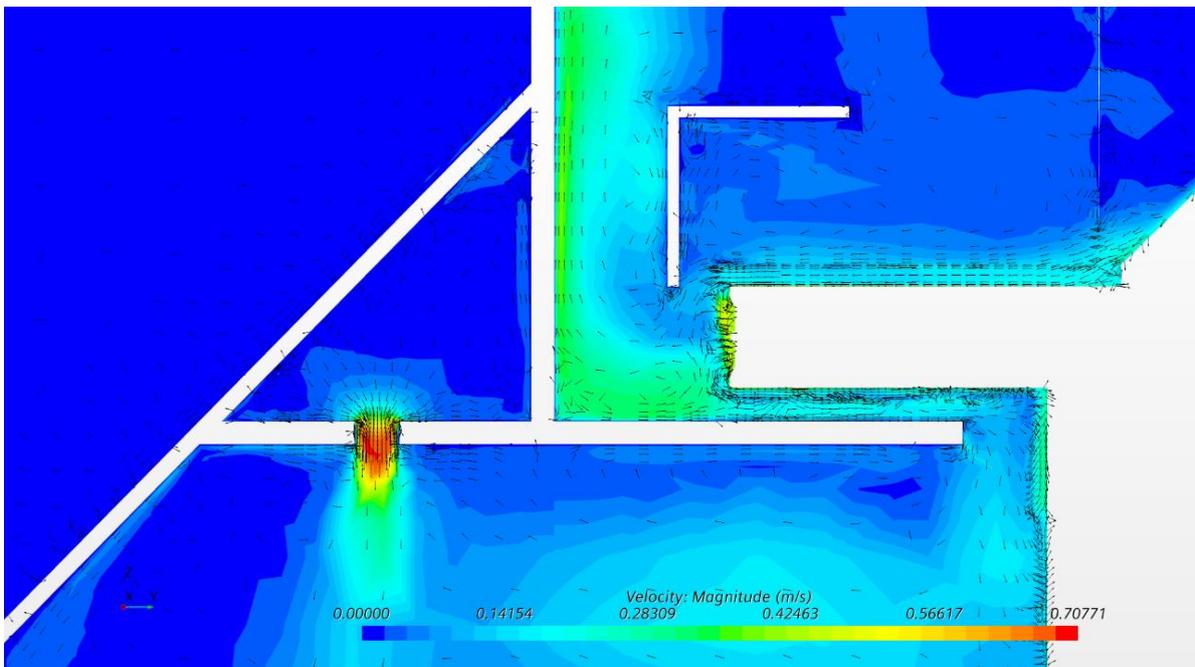


Ilustración 81: detalle del flujo en la zona del bandaje regulado a 6 cm

Se muestra ahora una sección horizontal a la altura de la cámara tórica de reparto de agua bruta. En ella se puede observar claramente diferenciadas las zonas perimetral (en color azul intenso, sinónimo de velocidades bajas) e interior de la campana en donde se localiza la turbina. Este último elemento se encuentra visto en corte por la parte que actúa como impulsor lo que permite apreciar sus álabes.

También se aprecia el choque del flujo de agua que llega desde la tubería de entrada (marcado en color rojo-anaranjado) donde impacta contra la pared de la cámara tórica y es reorientado hacia los laterales de la misma.

Como se ha comentado previamente, la disposición espacial de estos 12 orificios de reparto añadido a que todos cuentan con el mismo diámetro, hace que haya variaciones de velocidad según el agua se va alejando de la zona de entrada de agua a la cámara tórica.

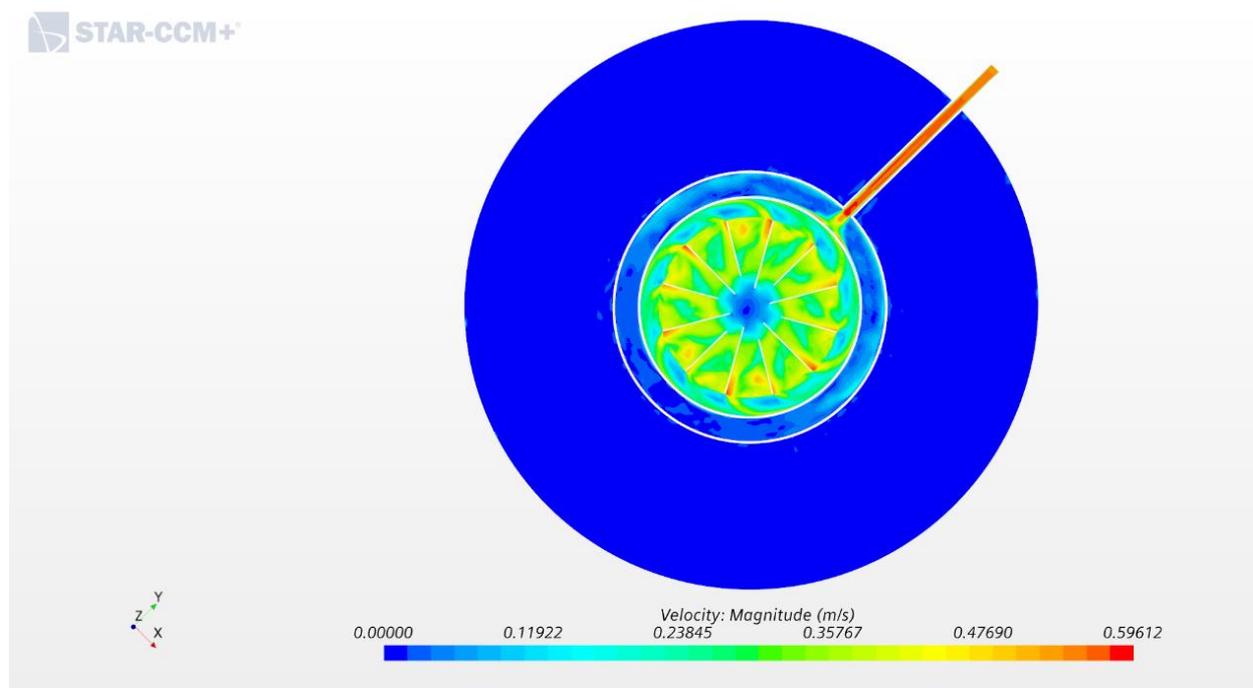


Ilustración 82: Campo de velocidades en sección horizontal a la altura de la turbina (bandaje a 6 cm)

En este último gráfico, se ha practicado una sección horizontal a $\frac{3}{4}$ partes de la altura máxima del decantador, en donde se encuentran los cuatro deflectores instalados en el interior de la campana. Se observa como el flujo disminuye su velocidad tangencial al encontrarse con el obstáculo que representan los deflectores y se transforma a velocidad normal.

Adicionalmente, se aprecia cómo la zona comprendida entre la camisa cilíndrica superior y la campana es donde se dan las velocidades más elevadas de la sección como consecuencia del agua que fluye desde el interior de la campana hacia el exterior por efecto del movimiento de la turbina.

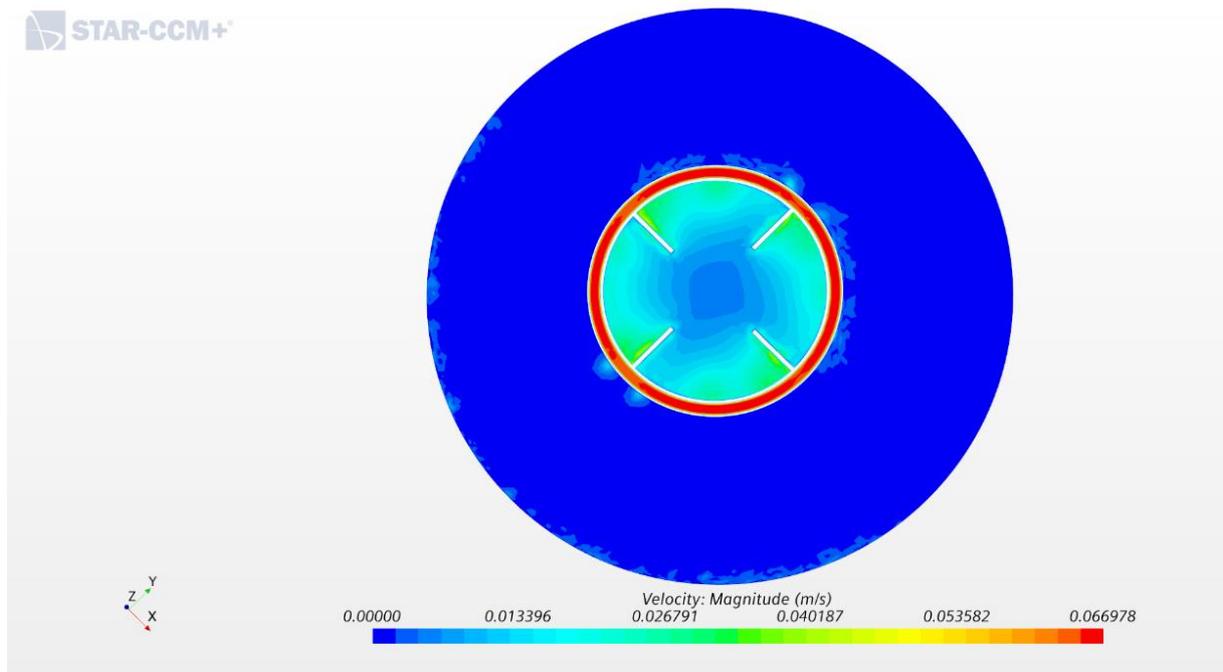


Ilustración 83: Campo de velocidades en sección horizontal de la parte superior del decantador (bandaje a 6 cm)

11.2.8. Posición bandaje 7 cm

Esta posición se corresponde con el bandaje prácticamente abierto del todo, estando parcialmente libre el camino para el agua que es impulsada por la zona superior de la turbina.

Al analizar en detalle el comportamiento hidráulico del decantador, se ha comprobado la existencia de dos zonas claramente diferenciadas, como se puede apreciar en la imagen inferior correspondiente a una sección vertical del decantador.

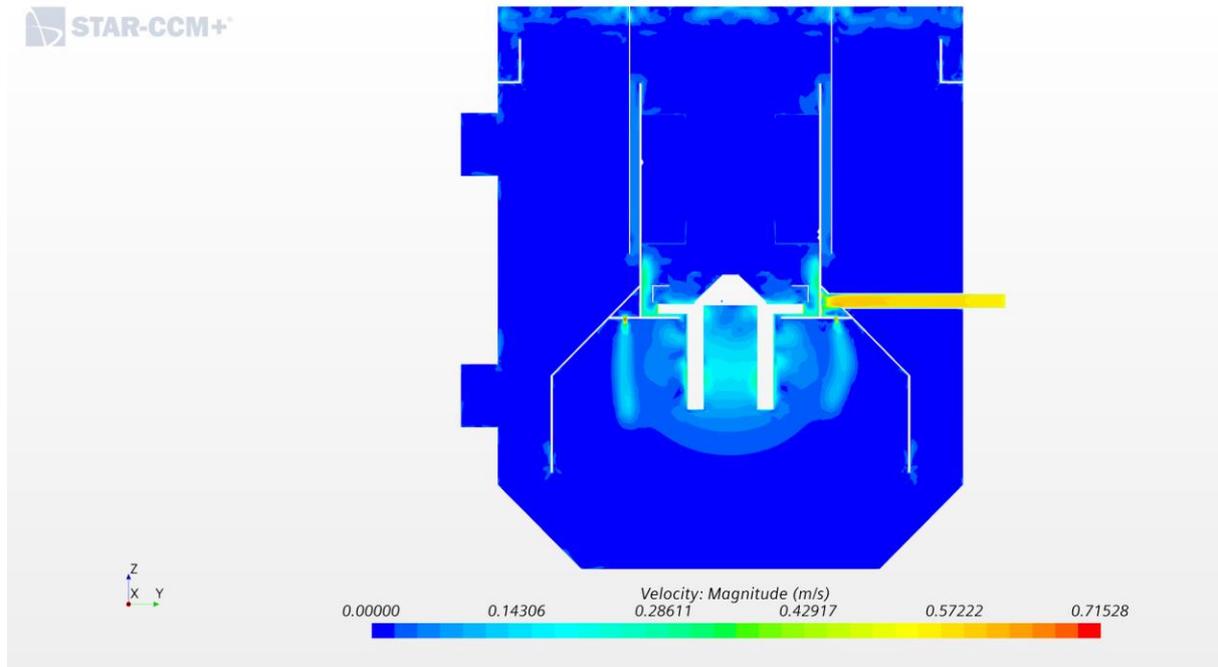


Ilustración 84: Campo de velocidades en el interior del decantador (bandaje a 7 cm)

Por un lado, está la zona perimetral externa a la campana en la que las velocidades son muy bajas, del orden de mm/s, que son las deseadas en una zona en la que sedimentan las partículas.

Por otro lado, está la zona interna de la campana, en la cual las velocidades son en torno a un orden de magnitud superiores a la velocidad de la parte exterior. Estas velocidades impiden que se produzca sedimentación en esta zona y permite la recirculación y agitación de los flóculos.

En esta otra ilustración, se presentan los sentidos de flujo del agua en el interior del decantador trazados junto a las velocidades en escala de colores. Es posible contemplar la influencia del reparto de agua bruta a través de los orificios de la cámara tórica hacia la zona interior de la campana del decantador, los cuales dibujan un flujo casi vertical hacia abajo. Todos a excepción del orificio que se observa a la derecha de la imagen, el primero que se encuentra el agua bruta al llegar a la cámara tórica de reparto.

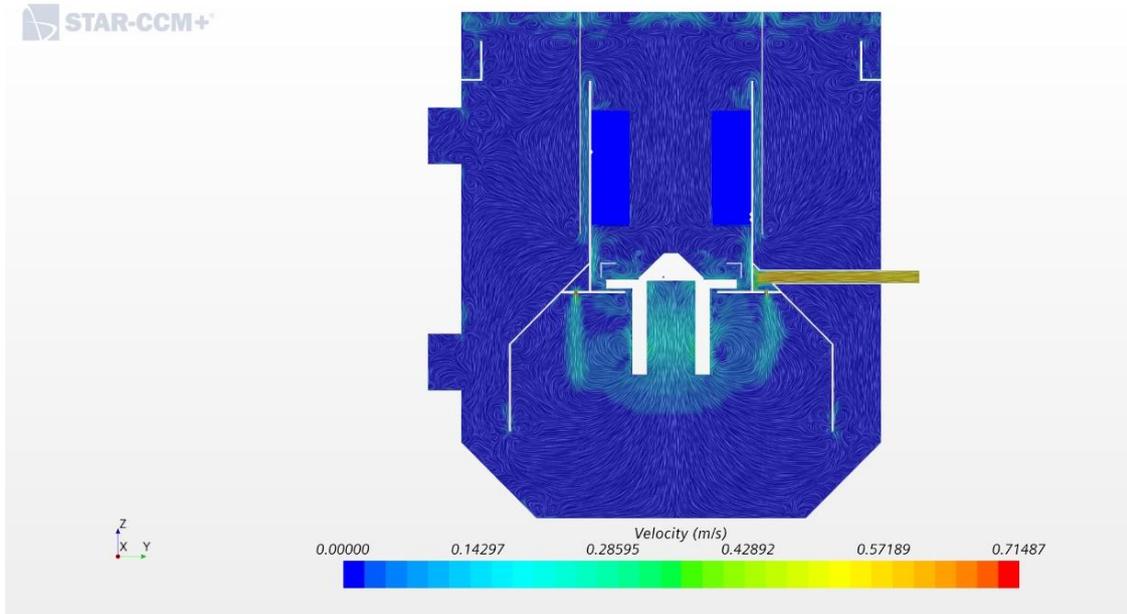


Ilustración 85: Sentidos de flujo del fluido en el interior del decantador (bandaje a 7 cm)

La turbina, por su lado, genera una agitación importante en toda la parte interna de la campana además de impulsar el fluido hacia la parte superior. En la parte inferior genera dos remolinos girando en sentidos opuestos uno a cada lado del agitador.

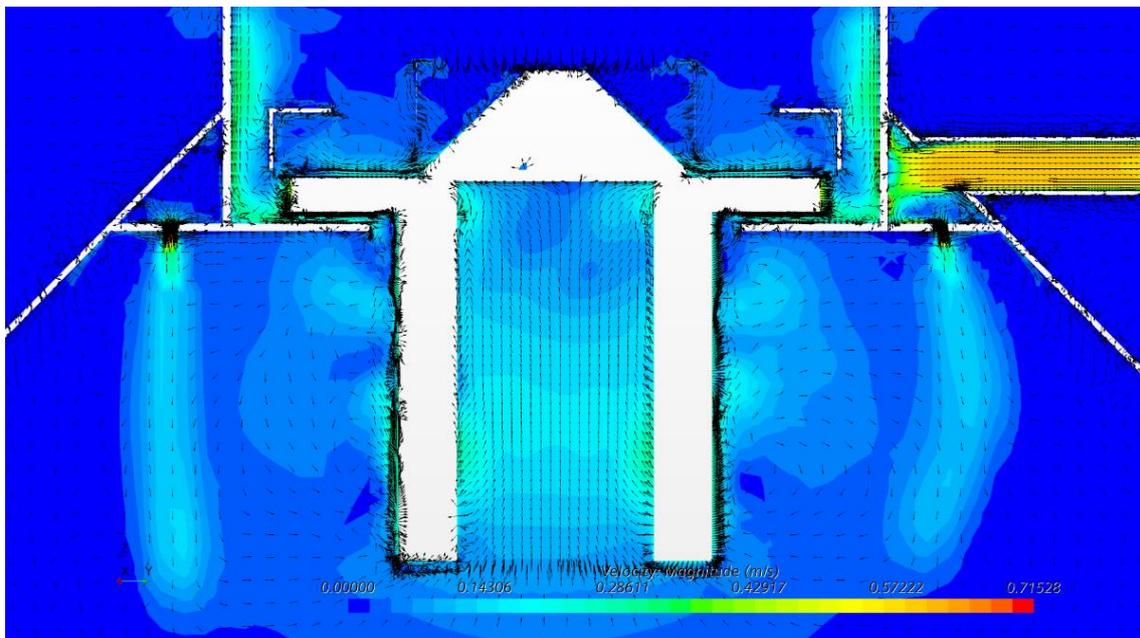


Ilustración 86: detalle del flujo en la zona de la turbina (bandaje a 7 cm)

En este caso, al estar el bandaje prácticamente abierto del todo, se puede apreciar cómo se permite el paso de prácticamente todo el flujo entre el bandaje y la pared de la campana. El agua es impulsada contra la parte exterior de la campana donde es deflectada y cambia su dirección.

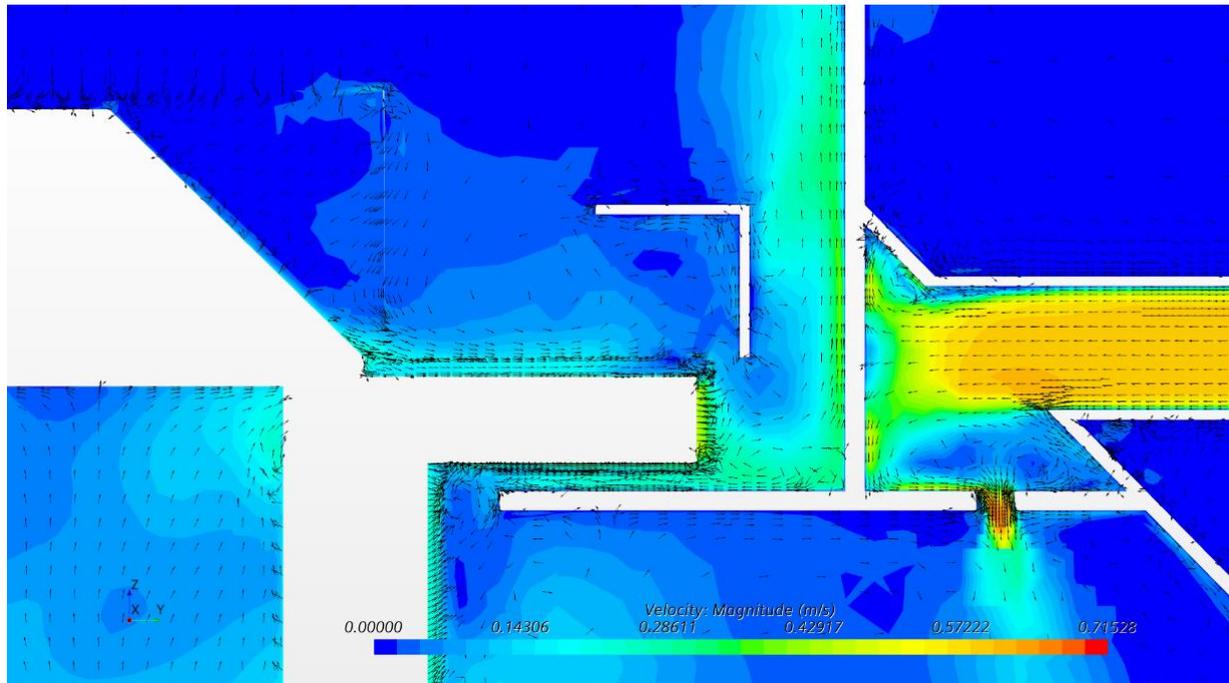


Ilustración 87: detalle del flujo en la zona del bandaje regulado a 7 cm

También, es posible apreciar en la imagen superior la entrada de agua a través del primer orificio que se encuentra justo en el mismo plano donde se conecta la tubería de entrada de agua bruta. Este agujero tiene un comportamiento diferenciado al resto, lo que con toda probabilidad es debido a que el agua al entrar en la cámara tórica de reparto choca frontalmente contra la pared vertical de la campana y se deflecta tanto hacia arriba como hacia abajo. Esta circunstancia y el recorrido posterior del agua hacen que la inyección de agua por este agujero no se produzca de manera vertical sino que se desvía unos pocos grados en sentido perimetral hacia el exterior.

11.2.9. Posición bandaje 8 cm

Esta posición se corresponde con el bandaje totalmente abierto, es decir, regulado a la altura más elevada posible, estando completamente libre el camino para el agua que es desplazada por la zona de la turbina que actúa como impulsor.

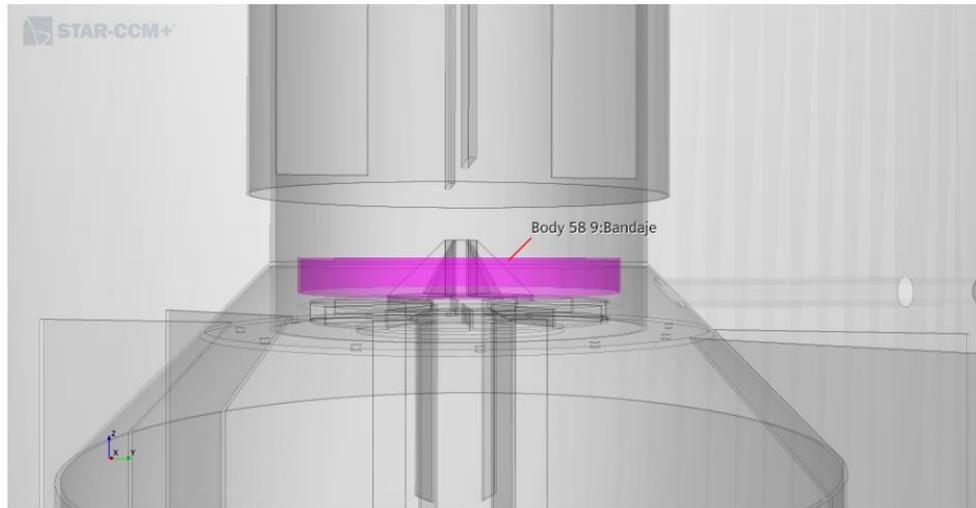


Ilustración 88: Posición del bandaje (marcado en color morado) en el interior del decantador

Al igual que en los casos anteriores, al analizar en detalle el comportamiento hidráulico del decantador, se destaca la existencia de dos zonas claramente diferenciadas, como se puede apreciar en la siguiente imagen correspondiente a una sección vertical del decantador

En este caso, se han obtenido resultados diferenciales en cuanto a las velocidades, la zona perimetral del decantador soporta velocidades superiores a las calculadas en los otros diseños. Además, se cuenta con una mayor agitación en prácticamente todo el dominio de estudio. Esto podría achacarse a algún problema a la hora de realizar el mallado de este modelo.

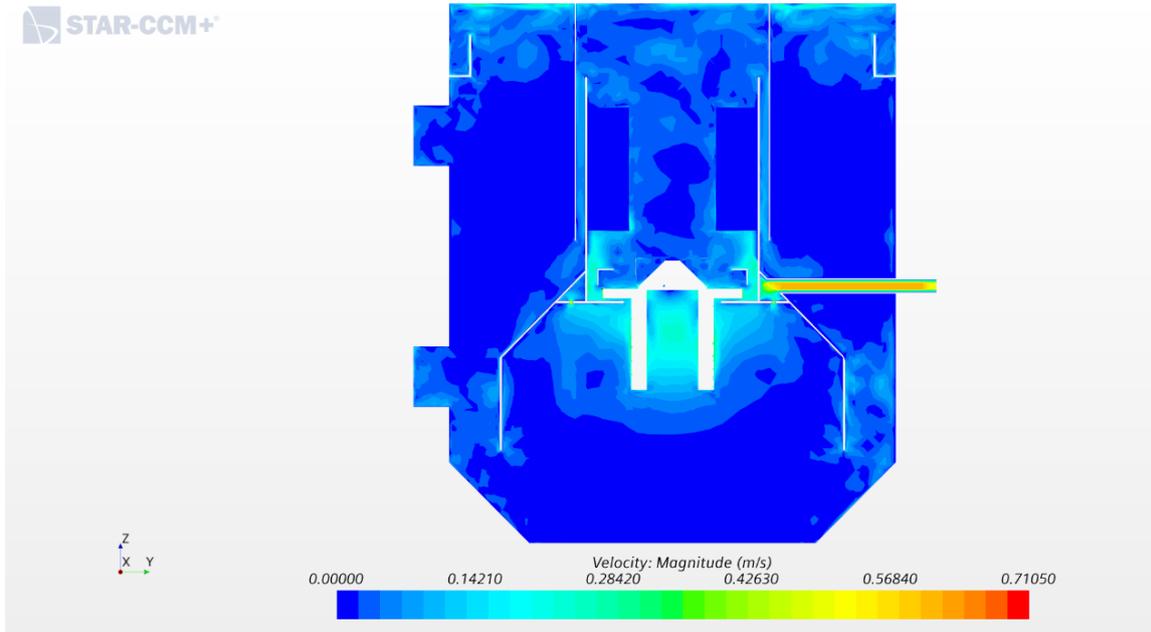


Ilustración 89: Campo de velocidades en el interior del decantador (bandaje a 8 cm)

En esta otra ilustración, se presentan los sentidos de flujo del agua en el interior del decantador trazados junto a las velocidades en escala de colores tipo arcoíris. Es posible apreciar que en esta posición del bandaje, se permite un gran caudal de recirculación junto con una evidente mayor influencia de la agitación en la parte superior de la campana.

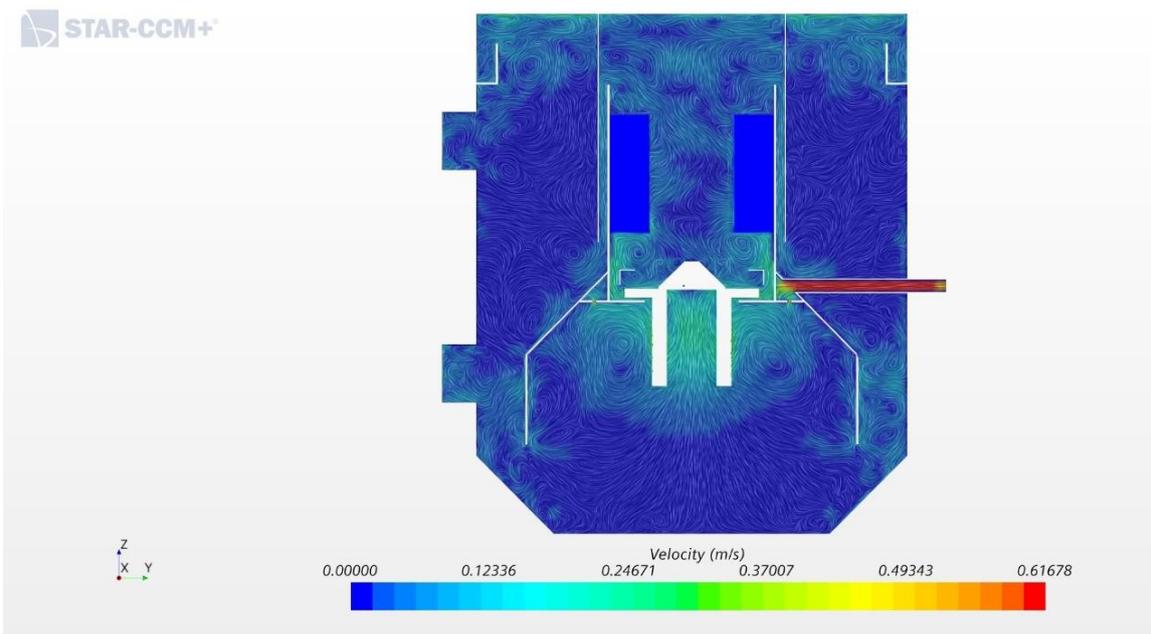


Ilustración 90: Sentidos de flujo del fluido en el interior del decantador (bandaje a 8 cm)

La turbina, por su parte, genera una agitación considerable en toda la parte interna de la campana además de impulsar el fluido hacia la parte superior. En la parte inferior, al igual que en el resto de los casos, genera dos remolinos girando en sentidos opuestos uno a cada lado del agitador.

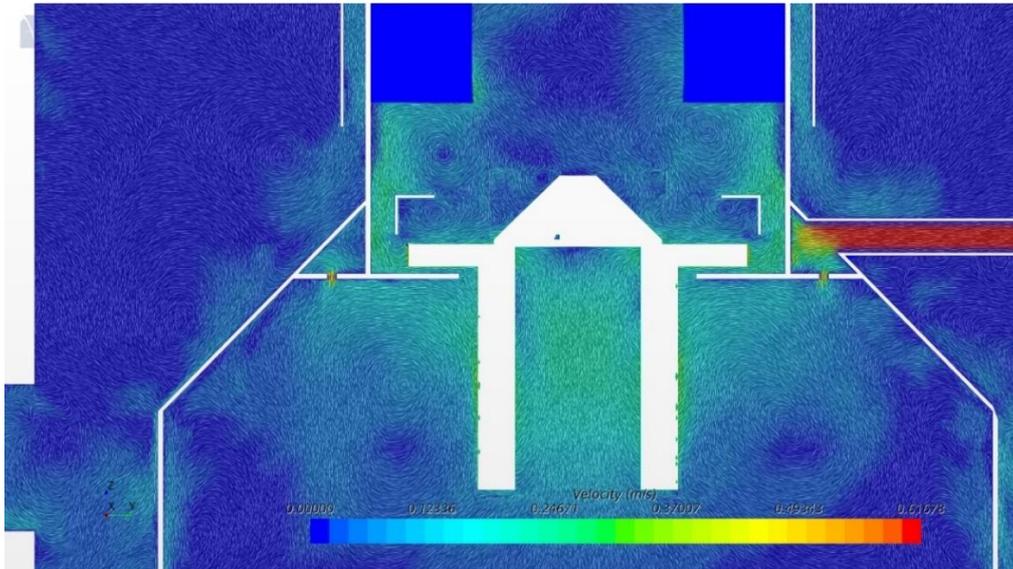


Ilustración 91: detalle del flujo en la zona de la turbina (bandaje a 8 cm)

En este caso, al estar el bandaje totalmente abierto, se puede apreciar cómo se permite el paso de prácticamente todo el flujo entre el bandaje y la pared de la campana. El agua es impulsada contra la parte exterior de la campana donde de defleca y cambia su dirección.

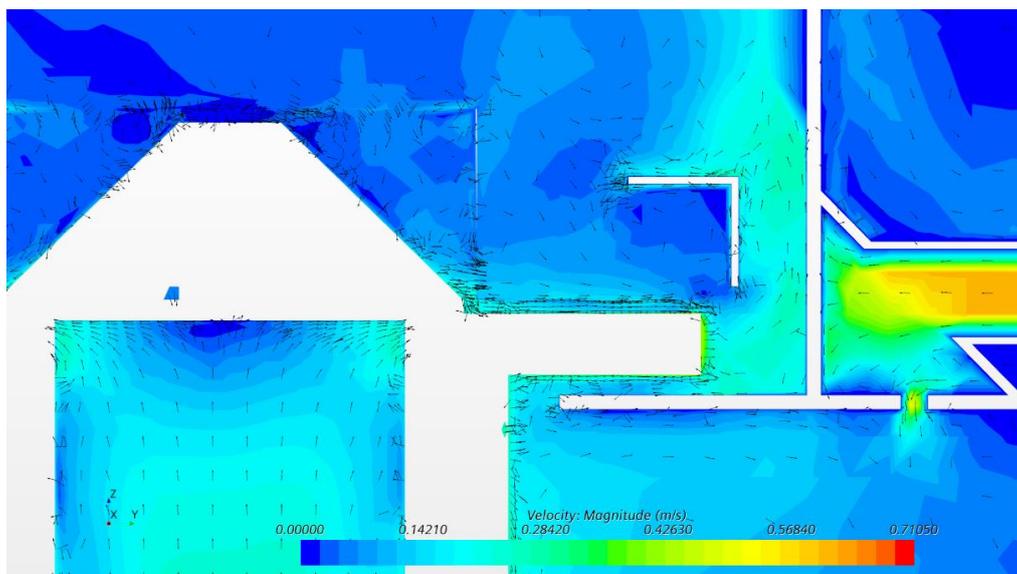


Ilustración 92: detalle del flujo en la zona del bandaje regulado a 8 cm

Se muestran ahora líneas de flujo que salen desde la parte interior de la campana a través de la camisa cilíndrica situada en la parte superior. De ese fluido proveniente del interior de la campana la gran mayoría se dirige hacia la parte inferior para volver a recircularse mientras que una pequeña parte va subiendo poco a poco hasta llegar a los vertederos superiores y abandonar el equipo por la tubería de salida

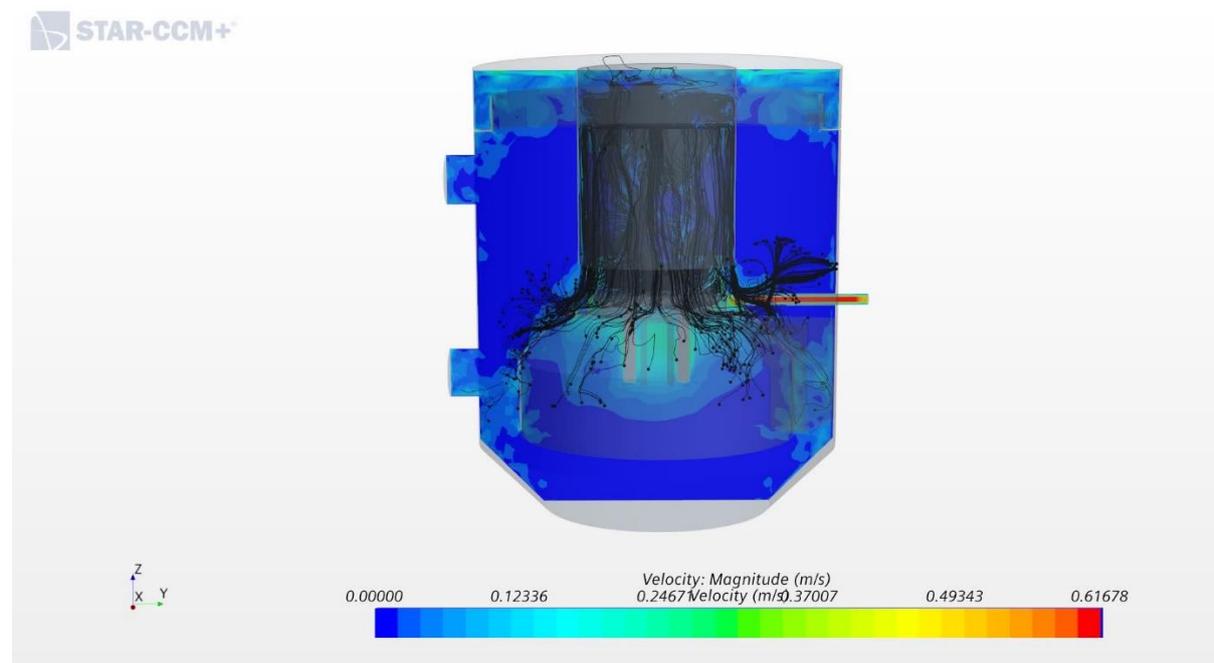


Ilustración 93: Líneas de flujo desde el interior de la campana (Bandaje a 8 cm)

11.3. Validación de resultados

Con el fin de validar los resultados presentados en el último apartado, se van a comparar los sentidos de flujo teóricos con los flujos simulados.

El tema de la validación de resultados en el caso de este decantador es singular, ya que carece de un manual que especifique exactamente los flujos o campos de velocidades esperados. Al mismo tiempo, se trata de un equipo que se encuentra en funcionamiento continuo y es opaco, lo que impide hacer observaciones sencillas de las condiciones del interior del decantador.

En caso de requerirse a futuro una validación por comparación de velocidades simuladas con las del interior del decantador real se debería optar por realizar mediciones mediante el uso de unos aparatos denominados vectrinos, con su

correspondiente coste económico. Estos son unos velocímetros perfiladores capaces de recoger información sobre velocidades en 3D.

Expuesta dicha singularidad, se ha decidido estudiar una importante cantidad de documentos referentes a los decantadores tipo Accelator, el correspondiente al de la planta piloto, para obtener los flujos teóricos esperados.

De la consulta de estos documentos (Degrémont, 1979) (Degrémont) se ha llegado a la conclusión de que el flujo teórico esperado para este decantador es el que se presenta a continuación marcado mediante flechas de color azul:

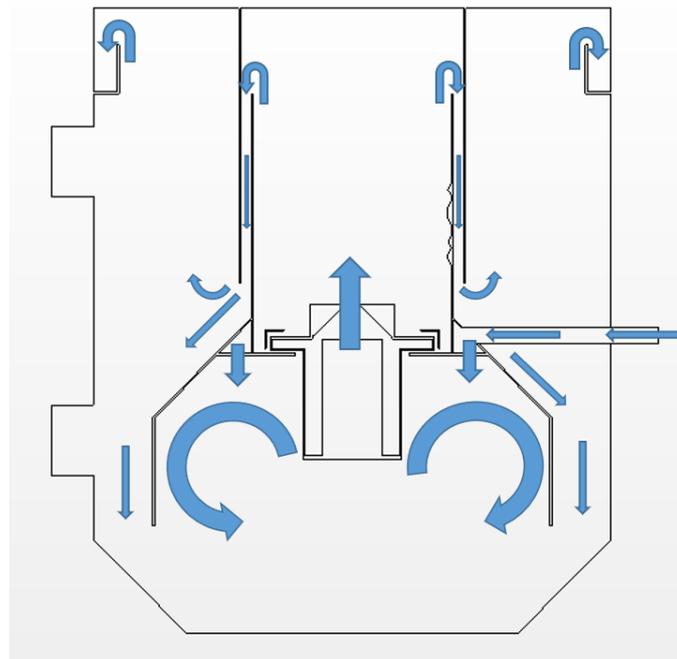


Ilustración 94: Flujos teóricos del interior del decantador

Por otra parte, del análisis de resultados de la simulación se puede observar cierta convención a la hora de describir los sentidos de flujo del fluido en el interior del equipo. Consecuentemente se ha elaborado una infografía con estos flujos de aspecto similar a la correspondiente al flujo teórico de forma que resulte sencilla la comparación entre ambas.

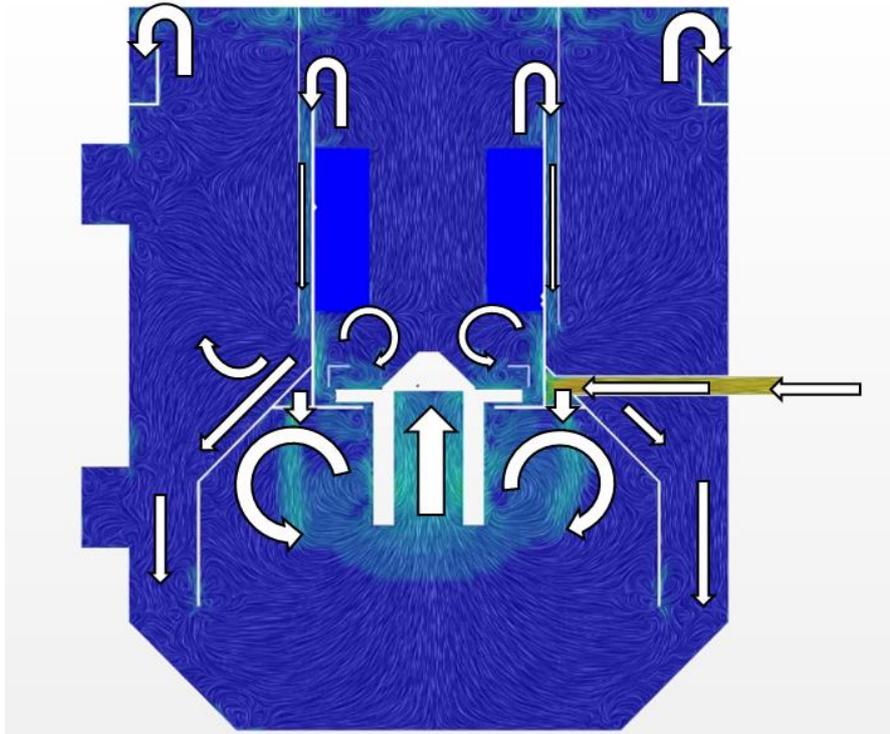


Ilustración 95: Flujos simulados en el interior del decantador

Comparando ambas imágenes colocándolas una al lado de la otra se comprueba cómo se cumplen todos los flujos teóricos esperados en las simulaciones realizadas. Como excepción se tiene los remolinos con giro opuesto que aparecen en la parte superior de la turbina, los cuales no estaban contemplados en las fuentes consultadas.

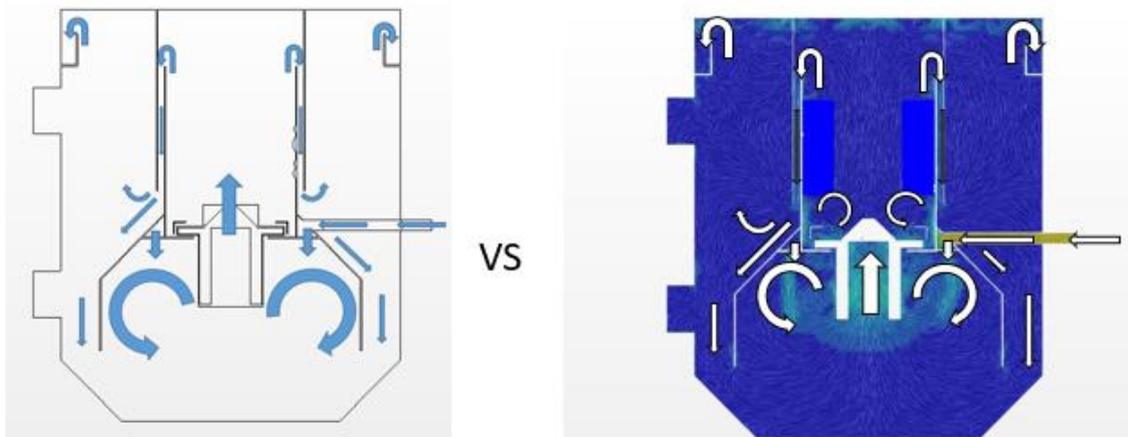


Ilustración 96: Comparación flujo teórico vs flujo simulado

12. LÍNEAS FUTURAS DE INVESTIGACIÓN

Como se ha ido comentando a lo largo del desarrollo de este documento, el alcance preliminar del proyecto incluía un estudio más amplio del decantador, una simulación en la que se incluyeran todos los fenómenos físicos ocurrientes en el interior del equipo enumerados y clasificados a continuación:

- Sí implementados en la simulación:
 - Proceso tridimensional
 - Giro de la turbina
 - Interfase entre la zona que rota (turbina) y otra estática (resto)
 - Superficie libre del agua
- No implementados en la simulación:
 - Mezcla multifase agua - fangos
 - Decantación
 - Sedimentación de partículas
 - Floculación

Sin embargo, el tiempo y la complejidad de estudiar e implementar en el software algunos de estos procesos han sobrepasado las expectativas para un proyecto de estas características. Por esta razón, se ha estimado conveniente proponer ciertos puntos de partida para líneas de investigación futuras basadas en los procesos que no se han podido simular en el programa CFD, de modo que en caso de que se desee continuar con las investigaciones de mecánica de fluidos computacional en torno al decantador de la planta piloto de Etxebarri, exista ya un esbozo para comenzar los trabajos.

Las líneas de investigación propuestas son tres:

- Simulación del flujo de fluido en el interior del decantador implementando la mezcla multifase agua - fangos y la decantación propiamente dicha (el proceso de desborde y caída del agua limpia por la parte superior a través del vertedero perimetral)
- Estudio de sedimentación de partículas en el interior del decantador mediante simulación CFD.
- Estudio de procesos químicos ocurrientes en el interior del decantador – Floculación.

13. PRESUPUESTO

Capítulo	Concepto	Unidad	Precio unitario (€/Ud.)	Cantidad (Ud.)	Precio total
1	Ingeniero Titulado	h	7,50	815	6.112,50 €
2	Equipos				
2.1	Ordenador de mesa	h	0,42	5472	2.298,24 €
2.2	Ordenador portátil	h	0,20	815	158,93 €
3	Licencias de software				
3.1	Ofimática	h	0,01	150	1,50 €
3.2	CFD	h	0,02	5472	109,44 €
3.3	Blender	h	0,00	20	0,00 €
3.4	AutoCAD	h	0,27	300	81,00 €
3.5	Navis Works	h	0,00	50	0,00 €
4	Material de oficina	Ud.	20,00	1	20,00 €
TOTAL					8.781,61 €

Tabla 4: Presupuesto del proyecto

La valoración económica del proyecto de Simulación CFD del flujo de fluido en el interior de un decantador circular asciende a la cantidad de OCHO MIL SETECIENTOS OCHENTA Y UN EUROS CON SESENTA Y UN CÉNTIMOS (8.781,61€).

En Bilbao, septiembre de 2022

14. GANTT

Se adjunta seguidamente una tabla donde se enumeran los hitos que ha tenido este proyecto junto a su duración, fecha de inicio y fecha de finalización. El diagrama de Gantt correspondiente se encuentra en la siguiente página.

<i>DESCRIPCIÓN DE TAREA</i>	<i>DURACIÓN</i>	<i>INICIO</i>	<i>FIN</i>
Propuesta de valor del proyecto	5 d	27/01/2022	01/02/2022
Formación en utilización avanzada del software CCM+	14 d	01/02/2022	14/02/2022
Estudio de bibliografía relacionada	228 d	01/02/2022	18/09/2022
Modelado de geometrías 3D en creciente grado de detalle	90 d	14/02/2022	15/05/2022
Simulación de los modelos de nivel de detalle medio	54 d	16/05/2022	09/07/2022
Simulación de los modelos de nivel de detalle medio (velocidad de turbina revisada)	54 d	10/07/2022	02/09/2022
Simulación CFD del flujo de fluido en el interior de un decantador circular	228 d	01/02/2022	18/09/2022

Tabla 5: Hitos para la realización del proyecto

Se presenta, a continuación, el diagrama de Gantt del proyecto:

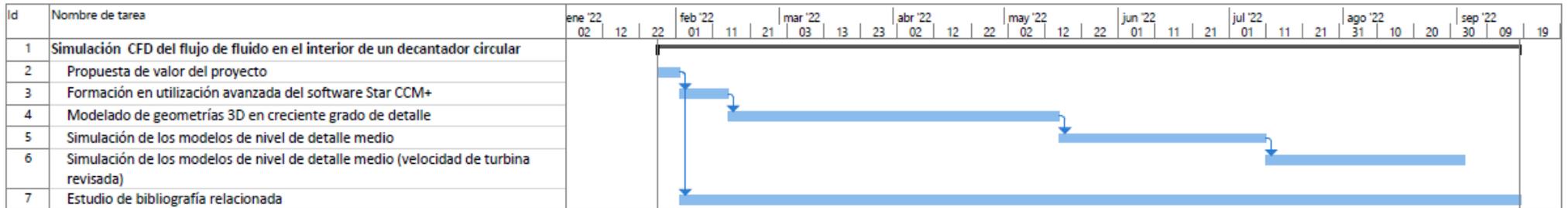


Ilustración 97: Diagrama de Gantt del proyecto

15. CONCLUSIONES

- Se ha conseguido demostrar que los flujos de fluido simulados mediante el software CFD Star CCM+ en el interior del decantador coinciden con los flujos teóricos esperados obtenidos a partir de la consulta de bibliografía especializada.
- Los campos de velocidades también coinciden en cuanto a órdenes de magnitud en lo que se esperaría para la zona perimetral en donde se debe producir el proceso de sedimentación de partículas en suspensión y la zona interior de la campana en donde se pretende lo contrario
- Además, se comprueba cómo al ir elevando el bandaje regulable que envuelve la turbina, se produce un aumento de la agitación en la cámara secundaria de la campana situada en la parte superior del decantador.
- Los resultados obtenidos de las simulaciones cuentan con una aceptable calidad teniendo en cuenta la correspondencia con los flujos y velocidades esperadas y el mallado realizado, siendo aproximadamente tres millones, el número de celdas en los que se ha discretizado cada uno de los nueve modelos.
- En caso de que se dispusiera de un equipo informático con mejores características técnicas se podría refinar aún más el mallado de forma que se obtendrían resultados con un mayor nivel de realismo.
- Adicionalmente, si se llegara a reparar la geometría elaborada directamente mediante los planos en 3D, podría simularse con una mayor rigurosidad el flujo de fluido de tal forma que se tendrían en cuenta todos los elementos del interior del decantador.
- La posibilidad de seguir estudiando el decantador de la Planta piloto de Etxebarri utilizando software CFD no se cierra con este proyecto, sino que puede servir como punto de partida de varias líneas de investigación propuestas basadas en los fenómenos físicos que no ha sido posible implementar en las simulaciones realizadas.

16. BIBLIOGRAFÍA

Ahern, D. (Julio de 2017). STUDY AND IMPROVEMENT OF THE PERFORMANCE OF AN INDUSTRIAL SETTLING TANK USING CFD MODELS IN OPENFOAM. *Trabajo Fin de Máster*. Valencia.

Ansar Ali, T. D. (2020). CFD SIMULATION MODEL FOR MIXING. *International Journal of Technical Research & Science*. Obtenido de [https://ijtrs.com/uploaded_paper/CFD%20SIMULATION%20MODEL%20FOR%20MIXING%20TANK%20USING%20MULTIPLE%20REFERENCE%20FRAME%20\(MRF\)%20IMPELLER%20ROTATION.pdf](https://ijtrs.com/uploaded_paper/CFD%20SIMULATION%20MODEL%20FOR%20MIXING%20TANK%20USING%20MULTIPLE%20REFERENCE%20FRAME%20(MRF)%20IMPELLER%20ROTATION.pdf)

ANSYS. (2012). Dressed for Success. *ANSYS Advantage, Volume VI, Issue 2*.

Asamblea General de las Naciones Unidas. (2015). Resolución aprobada por la Asamblea General el 25 de septiembre de 2015. 70/1. Transformar nuestro mundo: la Agenda 2030 para e. Nueva York: Naciones Unidas.

Bandrés, A. P. (2021-2022). Apuntes de la asignatura Mecánica de Fluidos Computacional. Bilbao: Escuela de Ingeniería de Bilbao.

Britannia, I. (8 de septiembre de 2022). *Ineos Britannia*. Obtenido de https://www.ineosbritannia.com/en/articles/276_Targeting-Americas-Cup-success-with-Amazon-Web-Services-AWS-.html

CABB. (2014). *Memoria del proyecto de obras ejecutadas de la planta piloto de Etxebarri*. Bilbao: PPTP.

CABB, *Competencias*. (25 de junio de 2022). Obtenido de CABB, *Competencias*: <https://www.consorciodeaguas.eus/Web/QuienesSomos/competencias.aspx>

CABB, *Reseña Histórica*. (18 de junio de 2022). Obtenido de CABB, *Reseña Histórica*: https://www.consorciodeaguas.eus/Web/QuienesSomos/resena_historica.aspx

Camp, T. R. (1946). Sedimentation and the design of settling tanks. *Trans. ASCE* 111 (2285), 895-936.

Coddii. (8 de septiembre de 2022). Obtenido de <http://coddii.org/wp-content/uploads/2016/10/Informe-CODDII-Industria-4.0.pdf>

- Consumo, M. d. (2002-2004). *CALIDAD DEL AGUA DE CONSUMO HUMANO EN ESPAÑA. INFORME TÉCNICO*. Madrid: Centro de publicaciones.
- Degrémont. (1979). *Manual Técnico del Agua*. Bilbao: Grafo.
- Degrémont. (s.f.). *Manual de operación Acclerator*.
- Dip. Bad. (10 de septiembre de 2022). Obtenido de <http://promedio.dip-badajoz.es/documentos/154303.pdf>
- Emad Imam, J. A. (1983). NUMERICAL MODELING OF SEDIMENTATION TANKS. *Journal of Hydraulic Engineering*, 1740-1754.
- Fatemeh Rostami, M. S. (2010). Numerical modeling on inlet aperture effects on flow pattern in primary settling tank. *Applied Mathematical Modelling*, 3010-3020.
- Gkesouli, A. S. (2015). Modeling settling tanks for water treatment using CFD. *Journal of Hydroinformatics*, 745-762.
- Hazen, A. (1904). On sedimentation. *Trans. ASCE* 53 (980), 45-88.
- Herrera Rodríguez, J. J. (2018). Los Objetivos de Desarrollo Sostenible una oportunidad para la Pyme. CEA.
- K. Samaras, A. Z. (2010). A CFD-based simulation study of a large scale flocculation tank. *Chemical Engineering Journal* 162, 208-216.
- Knolmar, D. M. (2020). CFD MODELLING OF PARTICLE SETTLING IN A SEDIMENTATION TANK. *International Journal of Advanced Engineering and Management Research*, 11-19.
- Ministerio de Agricultura, a. y. (9 de septiembre de 2022). [miteco.gob.es](https://www.miteco.gob.es). Obtenido de https://www.miteco.gob.es/es/agua/temas/sistema-espaniol-gestion-agua/37ciclointegraldelaguaurbanasistemasdegestionpdf_tcm30-215760.pdf
- Red Española Pacto Mundial. (23 de abril de 2022). *Pacto Mundial. Red Española*. Obtenido de <https://www.pactomundial.org/quienes-somos/>
- S. Lainé, L. P. (1999). Operating diagnostics on a flocculator-settling tank using fluent CFD software. *Wat. Sci. Tech Vol 39 No. 4*, 155-162.

- Siemens. (2019). *Manual de Usuario del software CFD Siemens Simcenter Star-CCM+*.
- Stamou, A. I. (1989). Numerical modeling. *J. Hydraul. Res*, 665-682.
- STEPHENS, K. M. (2009). CFD MODELLING OF FLOATING AND SETTLING PHASES IN SETTLING TANKS. *Seventh International Conference on CFD in the Minerals and Process Industries*. Melbourne,.
- Sustentable, S. o. (23 de abril de 2022). *Obtenido de Los 17 objetivos de desarrollo sostenible y 169 metas ODS*. Obtenido de <https://sostenibleosustentable.com/es/cambio-climatico/17-objetivos-desarrollo-sostenible-169-metas-ods/>
- Tchobanoglous, G. B. (2003). Physical Unit Operations. In *Wastewater engineering : treatment and reuse*. 396-411.
- TECH, H. a.-U. (9 de septiembre de 2022). *CTTC*. Obtenido de <https://www.cttc.upc.edu/?q=research/node/93>
- Trent, S. &. (1978).
- Wahlberg. (1998). Secondary clarifier analysis using data from the Clarifier Research Technical Committee protocol. *Water Environment Research* 70 (2), 249-253.
- Water Environment Federation. (2005). Primary Clarifier Design Concepts and Considerations. En *In Clarifier Design* (págs. 9-42). McGraw-Hill.
- Zhang, A. (2017). CFD Modeling and Optimization of Primary sedimentation tank. Estocolmo, Suecia.
- Zhu, Y. C. (2018). Clinical validation and assessment of aortic hemodynamics using computational fluid dynamics simulations from computed tomography angiography. *Biomedical Eng OnLine*, 17-53. Obtenido de <https://biomedical-engineering-online.biomedcentral.com/articles/10.1186/s12938-018-0485-5>