

Maestría en Ingeniería Civil

Comparación teórica entre las metodologías de diseño tradicionales y el uso de alternativas de CFD en el diseño de sedimentadores convencionales

Juan Ricardo Baraya Liévano

Bogotá, D.C., 4 de julio de 2017



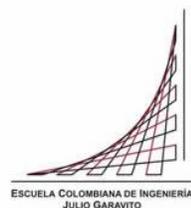
Comparación teórica entre las metodologías de diseño tradicionales y el uso de alternativas de CFD en el diseño de sedimentadores convencionales

Tesis para optar al título de magíster en Ingeniería Civil, con énfasis en recursos hídricos y medio ambiente

German Ricardo Santos Granados

Director

Bogotá, D.C., 4 de julio de 2017



La tesis de maestría titulada “Comparación teórica entre las metodologías de diseño tradicionales y el uso de alternativas de CFD en el diseño de sedimentadores convencionales”, presentada por Juan Ricardo Baraya Liévano, cumple con los requisitos establecidos para optar al título de Magíster en Ingeniería Civil con énfasis en recursos hidráulicos y medio ambiente.

Director de la tesis

Germán Ricardo Santos Granados

Jurado

Antonio Arenas Amado

Jurado

Germán Acero Riveros

Bogotá, D.C., viernes 4 de agosto de 2017

A mi Madre y a mi esposa por
todo su apoyo, insistencia y paciencia.

A Germán Santos por introducirme en el mundo
de la dinámica de fluidos computacional
y su infinita paciencia.

Agradecimientos

Agradezco a Dios por darme las fuerzas para no renunciar a este proyecto. Al Doctor Germán Santos Granados, quien dirigió la realización de esta tesis y siempre creyó que se podía terminar, a Bibiana Romero quien junto con el Dr. Santos siempre estuvieron dispuestos a encaminarme cada vez que fue necesario. En general a los profesores de la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito, a quienes les debo gran parte del profesional que soy hoy en día.

Doy las gracias especialmente a mi madre y a mi padre (q.e.p.d.) por su amor, incondicionalidad y todo el apoyo financiero que me dieron para la realización de mis estudios. Agradezco de manera especial a mi familia por el apoyo y la insistencia para que terminara este proyecto y hacerlo realidad.

Finalmente, le doy infinitas gracias a mi esposa por soportar el estrés, el desespero y los ratos de abandono, pero principalmente por todas sus palabras de apoyo y consejo para no desfallecer en el intento.

Resumen

Dentro del tratamiento del agua para su potabilización y posterior distribución a la población, se realizan distintos procesos entre los cuales, normalmente se destacan la coagulación, la floculación, la sedimentación, la filtración y por último la desinfección.

Este estudio se realiza sobre el proceso de sedimentación, en el cual se decantan las partículas floculentas producidas en la floculación, removiendo las partículas diluidas en el agua que producen la turbiedad. No obstante la importancia de este proceso en la actualidad, como desde hace varias décadas, este tipo de estructuras se dimensionan con base en relaciones y parámetros, que han sido estipulados a través de la experiencia en numerosas plantas de tratamiento alrededor del mundo.

Aunque diversos estudios, han demostrado que al interior de una estructura, a simple vista sencilla como un sedimentador, en realidad se presentan fenómenos importantes que pueden afectar la eficiencia de este tipo de estructuras.

El presente estudio pretende mostrar la utilidad de las simulaciones de la dinámica de fluidos computacional (CFD por sus siglas en inglés), a través de la cual se pudo observar de manera aproximada, el comportamiento hidráulico de las estructuras de sedimentación.

Para tal fin, este trabajo se basó en información sobre los tamaños y distribución de partículas recopilada en estudios realizados por fuera de Colombia, ante la imposibilidad de encontrar o realizar un estudio de ese tipo en una planta al interior del país.

Al finalizar, se demostró la capacidad de la simulación para predecir la distribución de partículas a la salida de la estructura, como también se pudo observar el comportamiento hidráulico del flujo al interior del sedimentador analizado, encontrando que elementos como las estructuras de entrada y salida, pueden llegar a afectar la eficiencia de la estructura.

Índice general

Introducción	14
Capítulo 1 Objetivos	17
1.1 Objetivo general	17
1.2 Objetivos específicos	17
Capítulo 1 Marco Teórico	18
1.1 Antecedentes	18
1.2 Bases teóricas	30
1.2.1 Teoría de la sedimentación	30
1.2.1.1 Diseño hidráulico de sedimentador convencional.	33
1.2.1.1.1 Carga superficial.	33
1.2.1.1.2 Profundidad y tiempo de retención.	34
1.2.1.1.3 Forma de los tanques sedimentadores.	34
1.2.1.1.4 Velocidad horizontal.	34
1.2.1.1.5 Zonas de entrada y salida.	35
1.2.1.1.6 Zona de lodos.	36
1.2.1.1.7 Resumen de parámetros de diseño sedimentadores convencionales.	36
1.2.2 Elementos generales de la dinámica de fluidos computacional	37
1.2.2.1 Ecuaciones fundamentales del movimiento de fluidos.	38

1.2.2.2	Modelos de turbulencia.	39
1.2.2.3	Condiciones de frontera.	44
1.2.2.3.1	Condición de frontera de entrada (velocity inlet).	44
1.2.2.3.2	Condición de simetría (symmetry)	45
1.2.2.3.3	Condición de salida	45
1.2.2.3.4	Condición de pared (wall)	45
1.2.2.4	Métodos de solución.	49
1.2.2.4.1	Esquema adoptado para la solución.	49
1.2.2.4.2	Discretización espacial gradientes.	51
1.2.2.4.3	Discretización para términos convectivos.	52
1.2.2.4.4	Esquema de interpolación de la presión.	53
1.2.2.4.5	Método de acople Presión – Velocidad.	53
1.2.2.5	Simulación del transporte de partículas.	54
1.2.2.6	Simulación de los efectos de la turbulencia en el transporte de partículas.	56
1.2.2.7	Condiciones de frontera para la fase discreta.	59
1.2.2.7.1	Análisis de partículas.	59
1.2.2.7.2	Condiciones de entrada y salida	60
1.2.2.7.3	Condiciones de frontera para el fondo y paredes.	63
Capítulo 2 CFD aplicada al análisis de un sedimentador convencional		65
2.1	Diseño hidráulico de sedimentador convencional	65
2.2	Análisis de sedimentador convencional con CFD	67

2.2.1	Geometría y mallado.	67
2.2.2	Configuración del modelo.	69
2.2.3	Características del modelo de fase discreta	70
Capítulo 3 Resultados		74
3.1	Comportamiento hidráulico de la estructura	74
3.1.1	Perfiles de velocidad.	74
3.1.2	Líneas de corriente	80
3.1.3	Energía cinética turbulenta	82
3.1.4	Análisis de yplus en el fondo	83
3.2	Análisis de la sedimentación de partículas	85
Capítulo 4 Conclusiones		98
Bibliografía		102

Índice de tablas

Tabla 1 Procesos de purificación de agua	18
Tabla 2 Trabajos de simulación con CFD en tratamiento de agua	19
Tabla 3 Clasificación del proceso de sedimentación	31
Tabla 4 Clasificación del proceso de sedimentación según el sentido del flujo	31
Tabla 5 Parámetros de diseño de sedimentadores convencionales	37
Tabla 6 Modelos de turbulencia	40
Tabla 7 Constantes de coeficiente de arrastre (Morsi y Alexander 1972)	56
Tabla 8 Datos partículas asumidas para el análisis	61
Tabla 9 Métodos utilizados en el presente trabajo	69
Tabla 10 Condiciones de frontera utilizadas	70
Tabla 11 Características inyección de partículas	72

Índice de figuras

Figura 1 Tipos de aproximación para cercanías a la pared (Ansys 2016)	47
Figura 2 Diagramas de flujo de los esquemas segregado y acoplado	50
Figura 3 Gráfica de datos y distribución de Rosin - Rambler	62
Figura 4 Condición de frontera Reflejar para la fase discreta	63
Figura 5 Condición de frontera Atrapar para la fase discreta	64
Figura 6 Dimensiones y condiciones de frontera de la geometría utilizada	68
Figura 7 Número de partículas vs número de iteraciones	71
Figura 8 Características inyección de partículas	73
Figura 9 Secciones (líneas) analizadas a lo largo del dominio computacional	76
Figura 10 Velocidad a 0.75 m de distancia de la zona de entrada	76
Figura 11 Velocidad a 2 m de distancia de la zona de entrada	77
Figura 12 Velocidad a 7.5 m de distancia de la zona de entrada	78
Figura 13 Afectaciones de la zona de salida	79
Figura 14 Contornos de velocidad en el dominio computacional	80
Figura 15 Líneas de corriente	81
Figura 16 Líneas de corriente (detalle de entrada)	82
Figura 17 Energía cinética turbulenta (TKE) en cada sección analizada	83
Figura 18 Comportamiento de y^+ en el fondo del sedimentador	84
Figura 19 Trayectorias de partículas con diámetros mayores a 7.12×10^{-4}	86
Figura 20 Trayectorias de partículas con diámetros entre 7.12×10^{-4} y 6.43×10^{-4}	87

Figura 21 Trayectorias de partículas con diámetros entre 6.43×10^{-4} y 5.73×10^{-4}	88
Figura 22 Trayectorias de partículas con diámetros entre 5.73×10^{-4} y 5.04×10^{-4}	88
Figura 23 Trayectorias de partículas con diámetros entre 5.04×10^{-4} y 4.35×10^{-4}	89
Figura 24 Trayectorias de partículas con diámetros entre 4.35×10^{-4} y 2.97×10^{-4}	89
Figura 25 Trayectorias de partículas con diámetros entre 2.97×10^{-4} y 2.28×10^{-4}	90
Figura 26 Trayectorias de partículas con diámetros entre 2.28×10^{-4} y 1.86×10^{-4}	90
Figura 27 Trayectorias de partículas con diámetros entre 1.86×10^{-4} y 1.03×10^{-4}	91
Figura 28 Trayectorias de partículas con diámetros entre 1.03×10^{-4} y 6.15×10^{-5}	91
Figura 29 Trayectorias de partículas con diámetros entre 6.15×10^{-5} y 2.00×10^{-5}	92
Figura 30 Comparación entre entrada y salida de la estructura (flujo másico)	93
Figura 31 Porcentaje de diámetros sedimentados	93
Figura 32 Masa de las partículas por diámetro y sección (0.01 m, 0.75 m, 1.00 m, 2.00 m)	94
Figura 33 Masa de las partículas por diámetro y sección (4.00 m, 6.00 m, 8.00 m, 10.00 m)	95
Figura 34 Masa de las partículas por diámetro y sección (12.00 m, 14.00 m, 16.00 m, 18.00 m)	96
Figura 35 Masa de las partículas por diámetro y sección (20.00 m, 21.00 m, 22.00 m)	97

Índice de anexos

Anexo 1 Documento base para el diseño del sedimentador

Anexo 2 Archivos simulación FLUENT de ANSYS

Anexos en versión digital

Introducción

El tratamiento del agua captada es de vital importancia para la obtención de agua apta para el consumo humano. El proceso de potabilización del agua está, generalmente, compuesto por los procesos de mezcla rápida, coagulación, floculación, sedimentación, filtración y desinfección. En determinados casos puede ser necesario la inclusión de otro tipo de procesos, como la aireación o la aplicación de cal para poder cumplir con los requisitos mínimos para el agua potable.

Los procesos de mezcla rápida, coagulación y floculación se realizan con el fin de lograr que las partículas coloidales disueltas en el agua se aglutinen, formando partículas de mayor tamaño denominadas flóculos o flocs. Dichas partículas pasaran posteriormente a los procesos de sedimentación y filtración los cuales, según Arboleda (2000), deberían considerarse como procesos complementarios, ya que en los sedimentadores se decantan los flocs más densos y los menos densos, o aquellos resuspendidos, son retenidos en los filtros.

Cada uno de estos procesos tiene una metodología de diseño para el dimensionamiento de las estructuras y sus interconexiones, que posteriormente conformaran lo que denominamos planta de tratamiento de agua potable o PTAP. El presente estudio se centró en analizar el proceso de sedimentación una vez que se han formado los flocs en el proceso de floculación.

Dentro del proceso de sedimentación existen varios tipos de estructuras que se utilizan para lograr decantar los flóculos, Arboleda (2000) clasifica estas estructuras de acuerdo con la velocidad de flujo en dos categorías, de velocidad baja y de velocidad alta. Dentro de las primeras se encuentran los sedimentadores de flujo horizontal y vertical, en la segunda clase, se pueden encontrar los de placas o pantallas y los de celdas.

Romero (2006), clasifica los sedimentadores de acuerdo con tipo de sedimentación dividiéndolos en cuatro tipos de sedimentación: Tipo 1 sedimentación de partículas discretas (desarenadores), Tipo 2 sedimentación de partículas aglomerables

(sedimentadores horizontales o de placas), Tipo 3 Soluciones de concentración intermedia (decantadores de flujo ascendente) y Tipo 4 soluciones de alta concentración (compactación de depósitos de lodos).

Para el caso de estudio analizado en el presente documento, se toma como base un sedimentador de flujo horizontal con sedimentación Tipo 2, sin embargo, aunque los flocs tienden a aglomerarse durante el proceso de sedimentación, dentro del análisis efectuado no se considera este fenómeno. Adicionalmente, las partículas de flocs se consideran de densidad constante con granulometría fija.

El dimensionamiento de la estructura analizada se basó en el material de la cátedra de diseño de plantas potabilizadoras de la Universidad Nacional Abierta y a Distancia, del cual se tomaron los datos de caudal tratado y se obtuvieron las dimensiones de la estructura.

Con el fin de tener datos de las partículas para ser analizadas, se buscó información referente a estudios realizados en plantas existentes, sobre la distribución de tamaños de las partículas entrantes y salientes a los sedimentadores, sin embargo, no fue posible encontrar alguno realizado en Colombia. Por otra parte, no se contó con los recursos financieros necesarios para la realización de un estudio de este tipo, razón por la cual se decidió tomar como base estudios internacionales.

Considerando lo anterior, las características de las partículas analizadas se tomaron del estudio realizado por Goula et al en 2007, en la planta de tratamiento de agua potable de la ciudad Thessaloniki en Grecia, en el cual llevaron a cabo mediciones de las partículas entrantes y salientes directamente en la estructura de sedimentación. Cabe aclarar que otros estudios fueron analizados, como el realizado por Yi Geng en 2005, para la PTAP de Tataskweyak Cree Nations Community ubicada en Manitoba – Canadá, sin embargo, éste último se basó en resultados de ensayos de jarras por lo que se consideró adecuado tomar como base el estudio efectuado en Grecia.

Con base en lo anterior, se realizó una simulación de la dinámica de fluidos y del transporte de sólidos, al interior del sedimentador dimensionado en ANSYS FLUENT con el fin de analizar el comportamiento hidráulico y la eficiencia en remoción de las partículas

entrantes. La simulación se realizó en 2D con una sola fase (agua), en un estado estacionario y utilizando el modelo de turbulencia k y ω SST, el cual hace uso de las fortalezas del modelo k y ε y mejora su comportamiento en las cercanías de las paredes.

El análisis del transporte de las partículas se efectuó mediante la aproximación Lagrangiana haciendo uso del modelo de fase discreta del software (DPM por sus siglas en inglés), en estado estacionario y sin considerar la interacción de las partículas con el fluido considerando la baja concentración, la afectación de la turbulencia sobre las partículas se analizó con el modelo estocástico de camino aleatorio (DRW por sus siglas en inglés).

El presente documento resume la literatura analizada para el desarrollo del estudio, describe los elementos básicos de la dinámica de fluidos, muestra la metodología para el dimensionamiento de los sedimentadores convencionales o de flujo horizontal, posteriormente detalla el análisis realizado y presenta las conclusiones del mismo. Lo anterior se realiza en seis capítulos y sus correspondientes subcapítulos.

Capítulo 1 Objetivos

1.1 Objetivo general

El objetivo general del presente estudio es realizar la comparación teórica entre el diseño de sedimentadores convencionales, efectuado mediante el uso de las teorías de sedimentación de partículas floculentas y la utilización de software de simulación de dinámica de fluidos computacional. Los resultados de esta comparación se analizarán con el fin de observar, si el dimensionamiento de las estructuras de sedimentación realizados hidráulicamente se comporta de acuerdo con lo proyectado en los diseños.

1.2 Objetivos específicos

A continuación, se presentan los objetivos específicos a partir de los cuales se busca alcanzar el objetivo general del presente trabajo.

- Realizar el diseño hidráulico de un sedimentador convencional de acuerdo con parámetros de caudal, tamaño de partículas y densidad de la misma previamente establecidas.
- Realizar la simulación de dinámica de fluidos computacional del sedimentador convencional a partir de los parámetros de diseño utilizados para el diseño del sedimentador convencional y los resultados dimensionales obtenidos en el mismo.
- Concluir si los diseños hidráulicos se ajustan al comportamiento real mostrado en las simulaciones o si por el contrario las estructuras se encuentran sub o sobre dimensionadas para los parámetros iniciales de entrada.

Capítulo 1

Marco Teórico

1.1 Antecedentes

La captación, tratamiento y desinfección del agua ha sido, es y será aspecto de vital importancia para la sociedad ya que de la existencia de agua potable depende la vida humana. No obstante, no existe un diseño de tratamiento típico debido a que la calidad de las fuentes de agua oscila grandemente entre una fuente y otra (Romero Rojas, 2006).

Aunque en el pasado reciente han surgido numerosos tipos de tratamiento de agua para el consumo humano de tipo compacto, existen determinados procesos (Tabla 1) para la purificación del agua, que de acuerdo con la calidad del agua de la fuente, se complementan entre sí para lograr una calidad del efluente apto para el consumo humano, de acuerdo con las normas vigentes que, para el caso de Colombia, se refieren al decreto 1594 y el Reglamento Técnico para el Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico (RAS2000).

Tabla 1 Procesos de purificación de agua

PROCESO	PROPÓSITO
Tratamiento Preliminar	
Cribado	Remoción de desechos grandes, que pueden obstruir o dañar los equipos de la planta.
Pre tratamiento Químico	Remoción eventual de algas y otros elementos acuáticos que, causan sabor, olor y color.
Pre sedimentación	Remoción de grava, arenas, limos y otros materiales sedimentables.
Aforo	Medir el agua cruda por tratar.
Tratamiento Principal	
Aireación	Remoción de olores y gases disueltos, adición de oxígeno para mejorar el sabor.
Coagulación/Floculación	Conversión de sólidos no sedimentables en sólidos sedimentables.
Sedimentación	Remoción de sólidos sedimentables.
Ablandamiento	Remoción de dureza.
Filtración	Remoción de sólidos finos, floc en suspensión y la mayor parte de microorganismos.
Adsorción	Remoción de sustancias orgánicas y color.
Estabilización	Prevención de incrustaciones y corrosión.
Fluorización	Prevención de caries dental.
Desinfección	Exterminio de organismos patógenos.

Fuente: Purificación del agua, Jairo Albero Romero Rojas

Cada uno de los procesos descritos en la tabla anterior, es objeto de un diseño detallado que se realiza por separado, el conjunto de los procesos diseñados y la transición entre éstos es lo que denominamos planta de tratamiento de agua.

El presente trabajo se centra en el análisis del proceso de sedimentación post-floculación, a partir del estudio de una clase de sedimentadores denominados convencionales, con base en el cual se busca establecer la eficiencia en la remoción de partículas estas estructuras. El estudio aplica los conceptos de dinámica de fluidos computacional (CFD por sus siglas en inglés), para analizar tanto el comportamiento hidráulico al interior de las estructuras, como las trayectorias de las partículas suspendidas en el agua influente.

Muchos aspectos afectan la capacidad y el funcionamiento de un sedimentador, tales como la carga superficial, el tipo de tanque, el mecanismo de remoción de los sólidos, el diseño de la entrada al tanque, entre otros factores. Con el fin de contemplar todos estos aspectos, los diseños actuales de los tanques de sedimentación generalmente sobredimensionan estas estructuras (Goula A. , Kostoglou, Karapantsios, & Zouboulis, 2007).

En general, un tanque de sedimentación puede parecer una estructura simple de separación, pero en su interior se presentan diversos fenómenos hidrodinámicos como corrientes de densidad, corrientes de fondo y corrientes de retorno superficiales (Goula A. , Kostoglou, Karapantsios, & Zouboulis, 2007).

Se han realizado diversos estudios mediante la aplicación de dinámica de fluidos computacional referentes al análisis de estructuras de sedimentación, aunque los mayores esfuerzos de simulación se han llevado a cabo para el tratamiento de aguas residuales. A este respecto Van Der Walt realiza un importante resumen de los trabajos realizados con anterioridad referentes al uso de CFD en el tratamiento de agua, los cuales se resumen en la Tabla 2 algunos de éstos se analizan a continuación junto con otros estudios encontrados durante la realización del presente trabajo.

Tabla 2 Trabajos de simulación con CFD en tratamiento de agua

AUTOR	AÑO	TITULO ESTUDIO
Larsen	1977	On the hydraulics of rectangular settling basins
Shamber and Larock	1981	Numerical analysis in sedimentation basins
	1983	Particle concentration prediction in settling basins
Imam and McCorquodale	1983	Simulation of flow in rectangular clarifiers
Imam,	1983	Numerical modeling of sedimentation tanks

AUTOR	AÑO	TITULO ESTUDIO
McCorquodale and Bewtra		
Larock, Shum and Shamber	1983	Computation of sedimentation basin behavior
DeVantier and Larock	1986	Modeling a recirculating density driven turbulent flow
	1987	Modeling sediment induced density currents in sedimentation basins
Stamou, Adams and Rodi	1989	Numerical modeling of flow and settling in primary rectangular clarifiers
Adams and Rodi	1989	Modeling of flow and mixing in sedimentation tanks
Casonato and Gallerdano	1990	A finite difference self-adaptive mesh solution of flow in sedimentation tank
McCorquodale et al	1991	Numerical simulation of unsteady conditions in clarifiers
Krebs	1991	The hydraulics of final settling tanks
Stamou	1991	On the prediction of flow and mixing in settling tanks using a curvature κ - ϵ model
Lyn, Stamou and Rodi	1992	Density currents and shear-induced flocculation in sedimentation tanks
Zhou and McCorquodale	1992	Modeling of rectangular settling tanks
Bretcher, Krebs and Hager	1992	Improvement of flow in final settling tanks
Krebs, Visher and Gujer	1992	Improvement of secondary clarifier efficiency by porous walls
McCorquodale and Zhou	1993	Effects of hydraulics and solids loading on clarifier performance
Frey et al	1993	Hydrodynamics fields and solid particle transport in a settling tank
Olsen and Skoglund	1994	Three dimensional numerical modeling of water and sediment flow in a sand-trap
Dahl, Larsen and Petersen	1994	Numerical modeling and measurement in a test secondary tank
Zhou, McCorquodale and Godo	1994	Short-circuiting and density interface in primary clarifiers
Krebs, Visher and Gujer	1995	Inlet structure design for final clarifiers
Van Der Walt	1996	Numerical modeling of two-phase flow in sedimentation tank
Ekama et al	1997	Theory, modeling design and operation
Van Der Walt	1998	Is a sedimentation tank really that simply?
Marais, Ekama and De Has	2000	Comparison of the 1D idealized flux theory and 2D hydrodynamic model with full scale secondary settling tank performance data
Van Der Walt	2000	Reflecting of CFD efforts in the water industry.

Fuente: *The modeling of water treatment tanks Van Der Walt (2002)*

La gran mayoría de estudios de sedimentación de partículas con CFD se han realizado para sistemas de tratamiento de aguas servidas (Goula A. , Kostoglou, Karapantsios, & Zouboulis,

2007) y (Al-Sammarrae & Chan, 2009), Larsen (1977) fue quizás el primero en aplicarla en varios sedimentadores, demostrando la existencia de las “cascadas de densidad” las cuales ocasionan que el fluido vaya hacia el fondo justo después de entrar a la estructura (Goula A. , Kostoglou, Karapantsios, & Zouboulis, 2007). Imam y McCorquodale (1983) estudiaron el flujo en un sedimentador rectangular, con densidad constante mediante la aplicación del método de funciones de vorticidad de corriente. Posteriormente, Imam, McCoerquodale y Bewtra (1983), incluyeron al modelo realizado anteriormente, un análisis de transporte al interior del sedimentador mediante la aplicación de una cantidad conocida de tinta. Los resultados obtenidos en el análisis realizado, fueron diferentes a los observados en la realidad. Los autores explican que esto es debido a los supuestos efectuados en el modelo y que pueden ser mejoradas mediante la aplicación de un modelo de turbulencia como el $k-\varepsilon$.

De Vantier y Larock (1987), modelaron la formación y el comportamiento de las corrientes de densidad presentes en un clarificador secundario de una planta de tratamiento de aguas residuales, debidas a la estratificación producida por la densidad de los sólidos presentes en el agua residual. Para dicha simulación, los autores aplicaron el modelo de turbulencia $k-\varepsilon$ y realizaron un análisis de sensibilidad para los valores iniciales de k y ε , encontrando que los valores definidos para estas variables no afectan los parámetros de la turbulencia.

Adams y Rodi (1990), utilizaron la simulación realizada por ellos mismos en 1989, la cual consistía en un modelo en dos dimensiones que simulaba el comportamiento del flujo en un sedimentador. En este estudio, realizaron análisis sobre la entrada y el campo de flujo de dos tanque de sedimentación en plantas de tratamiento de aguas residuales; En los resultados del modelo realizado, aplicando el modelo de turbulencia k y ε y solucionado con los esquemas HYBRD y QUICK, se encontró que aunque el esquema QUICK mejoraba la difusión numérica del esquema HYBRID, ambos producían valores más altos que los obtenidos experimentalmente, finalmente se sugirió mayor profundización en trabajos posteriores.

En 1991 Dahl et al, realizaron una modelación numérica para representar los fenómenos hidráulicos y de sedimentación en clarificadores secundarios; describiendo el campo de flujo turbulento y el fenómeno de transporte/dispersión de partículas. Para este estudio, se aplicó el modelo de turbulencia k y ε , la densidad se analizó en conjunto con la concentración de partículas. Nuevamente, los autores recomiendan mayores estudios en el tema estudiado.

Lyn et al (1992), presentaron un modelo numérico para el análisis de flujos turbulentos en tanques de sedimentación en dos dimensiones. El modelo resolvía las ecuaciones fundamentales de la dinámica de fluidos, junto con el modelo de turbulencia k y ϵ , para analizar los perfiles de velocidad de sedimentación y la floculación inducida en los tanques de sedimentación, por consecuencia de la turbulencia. En los resultados se encontró que, asumir una velocidad de sedimentación homogénea genera una sobreestimación de la eficiencia de los sedimentadores. Los análisis de este estudio fueron realizados en un clarificador rectangular real en Almhust – Suecia.

Zhou y McCorquodale (1992), presentaron un modelo matemático con el fin de predecir el campo de velocidades y el transporte de sólidos, en un tanque de sedimentación secundario de geometría rectangular. El modelo desarrollado se validó con tres investigaciones de campo, encontrando características similares en los datos físicos y los datos computacionales como una corriente de fondo y un flujo en sentido contrario sobre la zona de sedimentación.

Zhou, McCorquodale y Vitasovic (1992), estudiaron los efectos del número de Froude densimétrico en los campos de velocidad y de concentración de sólidos en clarificadores secundarios, adicionalmente estudiaron los efectos de la “cascada de densidad” a la entrada del clarificador para evaluar el efecto sobre las zonas de sedimentación, el patrón de flujo y la eficiencia de la estructura. Se comprobó la existencia de un número densimétrico de Froude óptimo de acuerdo con la geometría de la estructura y la carga superficial. De igual manera, demostraron la efectividad de los baffles a la entrada de la estructura de sedimentación.

Krebs, Stamou, Garcia-Heras y Rodi (1996), estudiaron la influencia de la configuración de la entrada y la salida de las estructuras de sedimentación tiene sobre el campo de flujo al interior de estas estructuras. Para el estudio, se utilizó un modelo numérico de dos dimensiones para predecir el campo de flujo, considerando las afectaciones por densidad, el flujo turbulento y la sedimentación de lodos activados. Dicho modelo fue validado con experimentos de laboratorio diseñados para este fin. El modelo demostró que, la configuración de la entrada en cuanto a ubicación y apertura afecta el funcionamiento de la estructura y el balance de energía al interior de la misma. La salida, aunque no es decisiva en el balance de energías al interior de la estructura, es importante para prevenir la aparición de velocidades ascensionales demasiado altas o la salida de sólidos que la alcanzan antes de ser sedimentados.

Jin et al (2000), presentaron un modelo unidimensional en estado estacionario, para el estudio de la sedimentación de partículas, en un tanque de sedimentación rectangular y considerando las partículas de forma discreta. El modelo fue realizado para ser aplicado en diferentes escenarios de caudal y concentración de partículas. De acuerdo con las conclusiones obtenidas, el modelo realizado puede ser aplicado para el diseño de sedimentadores primarios, con el fin de conocer la distribución de partículas en el efluente la cual es importante para los procesos de tratamiento siguientes.

En 2001 Brennan, realizó un modelo matemático para la simulación de un tanque de sedimentación considerando un modelo de dos fases en donde el agua representa la fase continua y el lodo activado la fase discreta, tratadas mediante la aproximación Euleriana. El modelo fue validado con modelos a escala y medida en una estructura real. La turbulencia se consideró con la aplicación de modelo k y ϵ , modificado para considerar los efectos de la densidad, la solución se realizó con el uso del algoritmo PISO.

Van Der Walt realizó en 2002, una simulación en dos dimensiones, para evaluar el comportamiento del sistema de sedimentación en la planta de tratamiento de agua potable de Vaalkop en Suráfrica. La simulación fue efectuada mediante la utilización de un seudomodelo de dos fases, que incorpora la interacción de los sólidos suspendidos con el agua, adicionalmente la convección y difusión de los sólidos fue considerada a través de un escalari y se simuló la turbulencia aplicando el modelo k y ϵ . El estudio realizado en 3D Flo++ demostró que, la ubicación de la entrada al tanque original era la causa de un mal funcionamiento en la remoción de los lodos de las tolvas.

Naser et al (2005), efectuaron un modelo en dos dimensiones, con el fin de estudiar la hidrodinámica de un sedimentador rectangular en régimen turbulento. El modelo utilizó el método de integración "Strip integral method", asumiendo un flujo completamente desarrollado y utilizando el perfil de velocidad de Rajaratnam, se convirtieron las ecuaciones generales del flujo de fluidos en ecuaciones diferenciales ordinarias. La turbulencia se consideró aplicando el modelo k y ϵ . La solución de las ecuaciones diferenciales se obtuvo mediante Runge – Kutta de cuarto orden. El modelo arrojó resultados satisfactorios prediciendo el flujo promedio al interior del sedimentador, también mostró que los resultados son sensibles al esfuerzo cortante turbulento, pero con el modelo k y ϵ , se obtuvieron resultados razonables.

Huggins et al (2005), analizaron posibles modificaciones sobre un pondaje artificial, diseñado para el cultivo de peces. El modelo fue creado mediante el uso de un software denominado “simulation of sediment movements in water intakes with multiblock options” (SSIIM) y considerando la turbulencia mediante el uso del modelo k y ϵ . Varias alternativas de modificaciones fueron analizadas, de las cuales se escogieron seis de acuerdo al porcentaje de sólidos removidos, en todas estas se añadía un baffle antes de la denominada “zona tranquila”. La mejora general de la estructura, no es significativa con respecto a la original la cual se nota en las partículas de menor tamaño (menores a $204\mu\text{m}$).

Yi Geng en el 2005, realizó un estudio sobre el agua del lago Split, el cual abastece la población de Tataskweyak Cree Nations Community en Manitoba Canadá, con el fin de comparar las propiedades de sedimentación de dos de los coagulantes utilizados en el tratamiento, sulfato de alumbre y policloruro de aluminio (PAC). Dentro del análisis se compararon las características de sedimentación, los tamaños de los flocs y la incidencia de la temperatura en las dimensiones de los flóculos. Los resultados obtenidos mostraron que, en promedio los tamaños de los flóculos producidos con el uso de PAC, son relativamente más pequeños, pero con mejores características de sedimentación, especialmente en temperaturas bajas, lo que podría indicar que la densidad de los flocs producidos con PAC, puede ser más alta que la de los producidos con sulfato de aluminio.

En 2008, Tamayo et al, analizan la posición óptima de la entrada a la estructura mediante la aplicación del método “Flow throw curves” (FTC), usado en análisis anteriores, comparándolo con un nuevo método para la evaluación de la eficiencia de los sedimentadores, basado en una aproximación Euleriana-Lagrangiana y que denominaron “particle tracking method” (PTM), adicionalmente evaluaron la posición óptima de los baffles. Lo resultados mostraron que el método FTC, el cual no considera la sedimentación de partículas, no es adecuado para el análisis de la eficiencia de las estructuras de sedimentación.

Okoth et al (2008), analizaron el funcionamiento de un separador de placas paralelas inclinadas, aplicando CFD mediante el uso del software CFX de ANSYS Inc. Se demostró la importancia de la velocidad de entrada, como de la concentración de sólidos en el agua. Igualmente, concluyeron que la inclinación de las placas, juega un papel importante en el funcionamiento del separador. A pesar de los resultados obtenidos, se recomiendan mayores estudios.

Goula et al, estudian en 2007 el efecto de una pantalla a la entrada de un tanque de sedimentación similar al utilizado en la planta de tratamiento de Thessaloniki, con una geometría en 2D. Para el análisis de las partículas se utilizó el método de Lagrange, aplicando el modelo de fase discreta (discrete phase model DPM) y con el fin de considerar los efectos de la turbulencia, se aplicó el modelo de turbulencia $k-\omega$ SST el cual describe con mayor certeza flujos con números de Reynolds bajos como los presentes al interior de un sedimentador, las paredes de la estructura se simularon como paredes lisas y la superficie libre se asumió como un plano de simetría. Las conclusiones del estudio muestran que, la profundización de la pantalla, en la entrada del tanque hacia el fondo del mismo, disminuye las zonas de recirculación mejorando la sedimentación; sin embargo, la mejora en la eficiencia de remoción de sólidos no es significativa.

Morin, Figue, Schaffner and Streinhardt, realizaron en 2008 estudios sobre HydroM.E.S.I (Matières En Suspension Intercepteur) un separador de partículas de placas paralelas para la separación de contaminantes de las aguas lluvias o de los picos del alcantarillado combinado. Se realiza un modelo en tres dimensiones con el uso del software CFX de ANSYS, utilizando el esquema Volume Of Fluid (VOF) y el modelo $k-\varepsilon$, para considerar la turbulencia; se analizó la influencia de la geometría en el funcionamiento del separador, se estudiaron aspectos como la razón entre largo y el ancho de la estructura, el cual fue modificado de 1 a 5, reduciendo el ancho de la estructura e incrementando el largo de la misma, la altura de la entrada al separador, la distancia entre el fondo y las placas y la ubicación de los canales de salida de la estructura. Los resultados del estudio que el adelgazamiento de la estructura incrementa la velocidad bajo las placas, formando vórtices bajo éstas, se demostró que el espaciamiento entre el fondo y las placas paralelas mejora la zona de sedimentación, adicionalmente el estudio concluye que, la ubicación de los canales de salida de la estructura depende de las medidas del separador de placas paralelas.

He Cheng et al (2008), realiza un análisis con el uso de CFD, para diseñar adecuaciones a un sedimentador de alta tasa, para la separación de los sólidos suspendidos totales en las aguas lluvias, dentro del plan maestro de aguas lluvias de la ciudad de Toronto. Los análisis se efectuaron con la utilización de FLUENT de ANSYS, aplicando el modelo VOF para resolver el campo de flujo, considerando la interacción aire – agua, la turbulencia se consideró con la aplicación del modelo $k-\varepsilon$; una vez resuelto el campo de flujo se utilizó el modelo DPM para la modelación de las partículas. Como resultado del estudio, se mejoró el sedimentador

modificando la forma en la que el agua entra a la estructura y removiendo las placas paralelas que ocasionaban altos costos de mantenimiento, las adecuaciones efectuadas mejoraron el funcionamiento del clarificador.

Drufesne (2008), estudia el comportamiento del flujo y la decantación de partículas en tres etapas que comprendieron: la construcción de un modelo físico, la modelación numérica en CFD y la aplicación del modelo en estructuras reales. La simulación numérica se realiza aplicando el modelo de turbulencia k- ϵ y el seguimiento de partículas mediante la aproximación lagrangiana. Sin embargo, el estudio fue limitado por la capacidad computacional de las máquinas utilizadas y se sugieren trabajos posteriores.

Goula et al (2008), realizan un estudio sobre el efecto de la temperatura del agua entrante en la eficiencia de un sedimentador circular, igual al utilizado en el estudio efectuado por ellos mismo en 2007. La simulación se realiza mediante el uso del software FLUENT de ANSYS, aplicando el modelo k- ω . Una vez resuelto el campo de flujo se efectúa el estudio de las partículas. el cual se realiza con el modelo DPM. Los resultados muestran, que variaciones de 1°C de incremento en la temperatura de influente con respecto al tanque, generan cambios en el campo de flujo, que se traducen en disminución de la eficiencia.

Thishen (2008), utilizó un modelo de CFD, para el análisis de un espesador de alto rendimiento al interior de cual se produce la floculación y la clarificación, como parte del proceso de la industria del azúcar. La simulación se lleva a cabo para dos fases y se considera el efecto de cambio de volumen de las partículas, debido a la floculación.

Razmi et al (2009), analizó la hidrodinámica de un clarificador primario y la implementación de un baffle para la optimización de la eficiencia de la estructura, la simulación se realiza mediante el uso del modelo volume of fluid (VOF) y para la turbulencia se aplicó, el modelo de esfuerzos de Reynolds (RNS por sus siglas en Ingles). Los resultados fueron validados mediante un modelo físico y el uso de un velocímetro de efecto doppler. Los resultados obtenidos mostraron que, la implementación de un baffle reduce las zonas muertas o de recirculación que afectan la decantación de las partículas, mejorando así la eficiencia del clarificador.

En 2009 Al Sammarrae et al, realizaron un estudio de un sedimentador rectangular de una planta de tratamiento de agua potable, con el fin de optimizar su funcionamiento, el estudio es efectuado en tres dimensiones utilizando modelos de simulación de grandes remolinos (LES

por sus siglas en inglés) para considerar la turbulencia. Para el análisis de las partículas, se utilizó la aproximación lagrangiana a través del modelo de fase discreta (DPM). Los resultados de la simulación realizada, muestran las ventajas del modelo de turbulencia LES sobre el $k-\varepsilon$ para resolver patrones de flujo de pequeña escala alrededor de las partículas que, no pueden ser resueltos con el modelo $k-\varepsilon$.

Continuando con el trabajo antes mencionado, Al Sammarrae et al, analizan el efecto de los baffles en el sedimentador estudiado bajo los mismos parámetros de simulación adoptados con anterioridad. Los resultados muestran que, la implementación de baffles en el sedimentador mejora la eficiencia de la estructura.

Stamou et al (2009), presentan un modelo de CFD, para el diseño de un sedimentador secundario para la planta de tratamiento de aguas residuales de Psyttalia en Atenas. El modelo en 2D es resuelto con el uso de CFX de ANSYS, considerando la interacción entre las partículas y el fluido, la turbulencia se analizó aplicando un modelo $k-\varepsilon$ modificado para considerar los efectos de la diferencia de densidades en la turbulencia. Con base en el modelo se determinaron las alturas de las láminas de agua, alturas de las capas de lodos y la concentración de sólidos suspendidos totales en el efluente.

Mohanarangam y Stephens (2009), presentan un modelo con el uso de CFD, específicamente del software CFX de ANSYS para el análisis de la sedimentación o flotabilidad de partículas al interior de un clarificador secundario. La simulación se realiza aplicando el modelo algebraico de velocidad relativa que, asume un solo medio o mezcla con partículas como fase discreta, adicionalmente se consideró la turbulencia mediante el modelo $k-\varepsilon$. Los resultados de la simulación mostraron, que era necesario un término adicional en la ecuación de momento, para la simulación de las dos fases flotante y sedimentante.

Pathapati et al (2009), simularon un separador hidrodinámico diseñado para la separación de material particulado en aguas lluvias, utilizando el modelo $k-\varepsilon$ para tener en cuenta los efectos de la turbulencia y la aproximación lagrangiana para el seguimiento de las partículas. Adicionalmente, en el estudio realizado, se utilizó el esquema SIMPLE para la solución de las ecuaciones de continuidad y momento, otros esquemas como el SIMPLEC y el PISO sin obtener mayores mejoras, en los resultados obtenidos con el esquema SIMPLE. Los resultados de la simulación realizada mostraron, la utilidad de la dinámica de fluidos computacional para la simulación de la concentración de partículas en el efluente, así como la granulometría de éstas.

En 2011 Ghawi et al, estudiaron el mejoramiento de clarificadores secundarios en la planta de tratamiento de aguas residuales de Al-Dewanyia en Iraq, en el estudio realizan una modelación en CFD, utilizando FLUENT 6.3 comparando el desempeño de un clarificador circular, de alimentación central típico y éste mismo, con la estructura de entrada modificada mediante la instalación de un baffle para disminuir la energía con la que entra el agua. Para analizar la sedimentación se utilizó un escalor que representa la concentración de sólidos, la velocidad de sedimentación se modelo con la función de Takács la cual fue incluida para la solución de la concentración de sólidos. Con el fin de considerar los efectos de la turbulencia se aplicó el modelo $k-\varepsilon$ estándar, para este estudio se asumió la superficie del clarificador como una pared sin rugosidad. Los resultados mostraron la capacidad del clarificador modificado, de soportar las sobrecargas de la planta.

En 2012 Kołodziejczyk et al, analizaron el campo de flujo en tanques sedimentadores de placas paralelas con diferentes configuraciones de éstas últimas, para el estudio realizan simulaciones de dinámica de fluidos computacional, mediante el software CFX de Ansys y la aplicación de los modelos $k-\varepsilon$ y SST, para analizar la turbulencia. Dentro del estudio se analiza únicamente el campo de flujo sin considerar la fase discreta. El estudio concluye que, los campos de flujo obtenidos mediante las simulaciones se ajustan a lo observado en el laboratorio, sin embargo, se recomienda continuar el estudio con la introducción de fases discretas.

Shelke et al (2012) estudia, mediante la aplicación de CFD, la separación del jugo de caña de los residuos de la caña de azúcar, en un clarificador con tiempos de retención bajos. El modelo se realiza en FLUENT de ANSYS, simulando dos fases (jugo y partículas) tratando las dos fases con la aproximación Euleriana, la turbulencia se consideró aplicando el modelo de turbulencia $k-\varepsilon$. Distintas velocidades de entrada se simularon, con el fin de analizar el funcionamiento del clarificador, con lo cual se pudo determinar la velocidad óptima de alimentación.

Yan en 2013, realiza una investigación sobre el funcionamiento de las cuencas de retención de aguas lluvias, dicho análisis se realiza sobre la cuenca Django Reinhardt. Diferentes condiciones de fondo, encontradas en la literatura, fueron analizadas sin encontrar predicciones acertadas, por tal razón se propone una nueva condición para el análisis de la sedimentación y la erosión, bajo condiciones no permanentes; la metodología propuesta arrojó mejores resultados en la predicción de las zonas de sedimentación, incluso, la metodología propuesta

en el estudio bajo condiciones no permanentes y utilizada en conjunto con el modelo de fase discreta, pudo reproducir la evolución del transporte de sedimentos. Lo anterior se realizó basado en modelaciones de CFD efectuadas en FLUENT de ANSYS, con la utilización del modelo DPM y el modelo $k-\varepsilon$ RNG y el uso de una condición de frontera en el fondo de la cuenca, basada en la energía cinética turbulenta (TKE por sus siglas en inglés).

En 2014 He y Marsalek, evaluaron en el laboratorio el mejoramiento de la sedimentación en las cuencas de retención, mediante la implementación de estructuras tipo cuadrícula en el fondo de la estructura. Para el estudio se realizaron, tanto modelos físicos como una simulación en CFD específicamente en FLUENT de ANSYS, esta última se efectúa aplicando el modelo VOF, con el fin de considerar la interacción entre el aire y el agua en la superficie de la estructura, la turbulencia se analizó con el modelo $k-\varepsilon$ RNG de dos ecuaciones. Los resultados observados mostraron, que la implantación de la estructura tipo cuadrícula en el fondo mejora la retención del material sedimentado, evitando su resuspensión.

Claro en 2014, analiza una nueva estructura de entrada para la cuenca de retención estudiada por Yan (2013), dicha estructura está compuesta por un desviador de aguas lluvias o “Leaping weir”, conformado por una abertura en el fondo del canal de entrada, a la cuenca de retención una transición tipo embudo que posteriormente, finaliza en una tubería al descargar en la estructura de sedimentación, adicionalmente, en el estudio efectuado se analiza una parte de la estructura de sedimentación, con el fin de estudiar el comportamiento de los sedimentos. Los análisis mencionados se efectúan mediante la aplicación de CFD, utilizando el modelo VOF para considerar la interacción aire agua, RNG $k-\varepsilon$ para estudiar los efectos de la turbulencia y para el estudio del transporte de partículas, se utilizó el esquema DPM. Los resultados obtenidos mostraron que el Leaping Weir, es capaz de retener cualquier tipo de partículas que varían en densidad y diámetro, que permitirán realizar análisis de laboratorio a los sedimentos influentes. En cuanto a la simulación de la cuenca de retención se concluyó que, la condición de frontera de fondo de Esfuerzo Cortante de Fondo o “bed shear stress”, da resultados similares a los obtenidos con la condición “trap” del esquema DPM de FLUENT contrario a la condición propuesta por Yan (2013), basada en el análisis de la energía cinética turbulenta, que al parecer da mejores resultados, se recomienda continuar el estudio de esta condición con diferentes caudales de entrada.

En este numeral, se realizó una breve revisión bibliográfica de la utilización de la dinámica de fluidos computacional, en el estudio de la sedimentación y transporte de partículas. Se puede observar que los mayores estudios, se han realizado para aguas residuales y que la sedimentación en sistemas de tratamiento de agua potable ha sido poco estudiada.

1.2 Bases teóricas

Este numeral presenta los conceptos teóricos en los cuales se basan los análisis realizados dentro del presente trabajo. Inicialmente se realiza una descripción de las teorías o formulaciones, sobre las cuales se efectúan normalmente los diseños de las estructuras de sedimentación utilizadas en plantas para tratamiento de agua potable, posteriormente se presentan las bases matemáticas, utilizadas en los modelos de dinámica de fluidos computacional (CFD por sus siglas en inglés), específicamente del modelo de fase discreta a partir del cual se realizan las modelaciones del presente estudio.

1.2.1 Teoría de la sedimentación

El proceso de separar o remover las partículas sólidas, de una suspensión mediante la fuerza de la gravedad se denomina sedimentación, en algunos casos es llamada también clarificación o espesamiento (Romero Rojas, 2006). La sedimentación es quizás, uno de los procesos de tratamiento del agua potable más antiguos que existen, el proceso de decantar el agua antes de ser bebida por los seres humanos es utilizada desde la antigüedad, incluso los asirios, romanos, incas y egipcios utilizaban esta técnica (Van Der Walt, 2002).

El proceso de sedimentación se divide en varios tipos como lo describe Romero (2006) en su libro "Purificación del agua", debido a las distintas clases de partículas que se encuentran en el agua. Dichas partículas pueden ser discretas y se caracterizan por no cambiar su forma, tamaño o peso mientras se sedimentan; o floculentas en las cuales la densidad y el volumen cambian a medida que éstas, se adhieren unas a otras mediante proceso de floculación, precipitación arrastre o barrido. (Romero Rojas, 2006). La siguiente tabla, tomada de "Teoría y práctica de la purificación del agua" (Arboleda Valencia, 2000), resume los cuatro tipos de sedimentación en los que se clasifica el proceso de acuerdo con las características de las partículas a sedimentar.

Tabla 3 Clasificación del proceso de sedimentación

Tipo de sedimentación	Características de las partículas suspendidas	Descripción del proceso	Ejemplo
1	Partículas discretas y aisladas en soluciones diluidas.	No hay interacción entre las partículas y entre las partículas y el resto del fluido.	Movimiento de sedimentación se partículas en desarenadores o presedimentadores.
2	Partículas aglomerables en soluciones relativamente diluidas.	Las partículas se aglomeran agrupándose en partículas de mayor tamaño.	Sedimentación de flocs en decantadores horizontales o de placas.
3	Soluciones de concentración intermedia.	Las partículas interfieren entre sí en su descenso manteniendo posiciones estables.	Deposición de lodos en decantadores de flujo ascendente.
4	Soluciones de alta concentración.	Se forma una estructura entre las partículas que va modificándose lentamente con el tiempo.	Compactación de depósitos de lodos.

Fuente: Teoría de la purificación del agua 3ed, Jorge Arboleda Valencia (2000)

El proceso de sedimentación también puede ser clasificado, por el sentido de flujo sea éste horizontal, vertical o inclinado. La Tabla 4 presenta la clasificación de acuerdo con el sentido del flujo.

Tabla 4 Clasificación del proceso de sedimentación según el sentido del flujo

Sentido de flujo	Tipos de sedimentación	Estructura ejemplo	Carga superficial
Horizontal	1 y 2	Desarenadores	200 – 420
			15 – 30
Vertical	2 y 3	Manto de lodos	45 – 60
Inclinado	1 y 2	Decantadores con módulos o placas	120 - 180

Fuente: Teoría de la purificación del agua 3ed, Jorge Arboleda Valencia (2000)

El presente estudio se centra en el análisis de un sedimentador convencional de flujo horizontal dimensionado a partir de los parámetros descritos en los numerales siguientes.

El diseño de sedimentadores se basa en valores obtenidos a través de la experiencia y la operación de prototipos piloto (Romero Rojas, 2006). Generalmente ha estado basado en el concepto de carga superficial y en asumir que el flujo al interior de la estructura es uniforme y unidireccional (Ghawi & Kris , 2011), incluso en la normatividad colombiana, específicamente en el Reglamento Técnico del Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico (RAS 2000), en

su título B, se recomienda el cumplimiento de ciertos valores para determinados parámetros como la carga superficial, el tiempo de retención, la profundidad del agua y la relación largo - ancho de los tanques entre otros, los cuales varían dependiendo del tipo de estructura a utilizar.

De acuerdo con Romero Rojas (2006), en la sedimentación de partículas floculentas la densidad y el volumen de las partículas cambia a medida que estas se adhieren unas a otras, debido a los procesos de floculación y precipitación química cambiando el peso de la partícula y la fuerza de arrastre cambiando así el equilibrio de fuerza lo que se traduce en la variación de las velocidades de asentamiento a través del tiempo y la profundidad, por la cual la remoción es función, no sólo de la carga superficial, sino de la profundidad y el tiempo de retención.

Aunque en la superficie un sedimentador puede parecer una estructura simple, en su interior se presentan un intrincado balance de fuerzas y fenómenos hidrodinámicos como corrientes de densidad, corrientes de fondo y contracorrientes en la superficie (Van Der Walt, 2002). No obstante, los parámetros generales, bajo los cuales han sido desde hace décadas, y son actualmente, diseñadas las estructuras de sedimentación no describen adecuadamente el comportamiento hidráulico de los sedimentadores, razón por la cual es común el sobredimensionamiento de las estructuras, lo que conlleva no sólo a costos innecesarios sino también a pérdidas innecesarias de agua (Al-Sammaraee, Chan, Salim, & Mahabaleswar, 2009). Adicionalmente, el diseño inadecuado produce una sobrecarga en los filtros lo que aumenta la frecuencia del retrolavado, ocasionando pérdida del agua tratada (Al-Sammaraee, Chan, Salim, & Mahabaleswar, 2009).

Por lo anterior, el conocimiento apropiado del comportamiento hidráulico de los tanques de sedimentación es necesario para el diseño y operación de estas estructuras (Van Der Walt, 2002), ya que los tanques de sedimentación son una de las estructuras más importantes en las plantas de tratamiento, y el comportamiento hidráulico al interior de la estructura es de suma importancia para su adecuado funcionamiento, a parte de los procesos físico – químicos y de floculación que ocurren en el interior (Al-Sammarae & Chan, 2009).

Aunque el sedimentador que se analizará en este estudio, hace parte de un proceso de tratamiento de agua potable y el proceso de sedimentación ocurre después de la floculación, es decir las partículas corresponden a flocs que son partículas aglomerables; el análisis de las partículas se realizará considerando las partículas discretas. Lo anterior se realiza por

conveniencia con el fin de poder predecir más fácilmente las velocidades de asentamiento y la remoción de material suspendido (Romero Rojas, 2006), el no considerar el efecto de la aglomeración de las partículas, es un estado crítico considerando que cuando dos partículas se aglomeran generalmente la velocidad de asentamiento de la nueva partícula es mayor (Romero Rojas, 2006).

Teniendo en cuenta lo mencionado anteriormente, a continuación, se presentan los parámetros considerados dentro del diseño de las estructuras antes mencionadas, con base en los cuales se diseñan actualmente los sedimentadores en Colombia, considerando que la estructura analizada corresponde a un sedimentador de flujo horizontal (convencional).

1.2.1.1 Diseño hidráulico de sedimentador convencional.

El sedimentador denominado convencional corresponde a un sedimentador de flujo horizontal, estructuras que, de acuerdo con la literatura y las recomendaciones de la normatividad colombiana, deben cumplir los siguientes parámetros al momento de efectuar el diseño.

1.2.1.1.1 Carga superficial.

El área superficial del tanque de sedimentación, es una de las principales características la cual depende de la carga superficial dada por la Ecuación 1, que es uno de los parámetros más utilizados en el diseño y clasificación de los sedimentadores (Romero Rojas, 2006).

$$U = \frac{Q}{A}$$

Donde,

U es la carga superficial (m/d)

Q es caudal de entrada a la estructura (m³/d)

A es el área superficial de la zona de sedimentación (m²)

Ecuación 1 Carga Superficial

La relación anterior es la velocidad crítica mínima de sedimentación, que se espera tenga un porcentaje (70-98%) de las partículas suspendidas en el agua (Arboleda Valencia, 2000). La carga superficial depende de aspectos tales como la calidad del agua cruda, peso y grado de hidratación del floc, forma y tipo de sedimentador, cuidado y control del proceso, tipo de coagulante, grado de eficiencia que se desee (Arboleda Valencia, 2000).

La carga superficial puede determinarse por medio de ensayos de sedimentación, sin embargo, a falta de datos experimentales pueden adoptarse especificaciones de tipo general (Arboleda Valencia, 2000).

1.2.1.1.2 Profundidad y tiempo de retención.

El tiempo o periodo de retención es el tiempo máximo que la partícula, con la mínima velocidad de sedimentación escogida, tarda en llegar al fondo, razón por la cual es directamente dependiente de la profundidad del tanque. Los sedimentadores convencionales no pueden concebirse con profundidades muy pequeñas, debido a que: i) la velocidad de flujo horizontal no puede ser muy alta, ii) existen interferencias que revuelven el sedimentador (corrientes de densidad, térmicas, etc.) (Arboleda Valencia, 2000). El tiempo de retención está dado por la Ecuación 2.

$$t = \frac{V}{Q} = \frac{Ad}{Q}$$

Donde,

V es el volumen

t es el tiempo de retención

Q es caudal de entrada a la estructura (m³/d)

A es el área superficial de la zona de sedimentación (m²)

d es la profundidad del tanque

Ecuación 2 Tiempo de retención

1.2.1.1.3 Forma de los tanques sedimentadores.

Los sedimentadores de flujo horizontal pueden ser de forma rectangular o circular, aunque los más usados son los primeros de los cuales los tanques más largos, suelen dar mejores resultados con relaciones Largo/Ancho, que varían entre 1/2,5 y 1/10. Los circulares se usan más frecuentemente en el tratamiento de aguas negras (Arboleda Valencia, 2000).

1.2.1.1.4 Velocidad horizontal.

La velocidad horizontal a través del tanque produce dos efectos opuestos, i) incrementa el proceso de floculación dentro de la estructura, ii) arrastra y resuspende partículas ya decantadas. Por esta razón, la velocidad horizontal debe ser tal que estimule la floculación, pero que no llegue a alterar la eficiencia de la sedimentación (Arboleda Valencia, 2000). La velocidad horizontal, no será siempre uniforme en toda la sección transversal de la estructura perpendicular, a la dirección de flujo debido a la existencia de corrientes de densidad, corrientes de inercia, fenómenos de cortocircuito y operación de mecanismos de remoción de lodos (Romero Rojas, 2006).

Las corrientes de densidad se producen por el flujo de un fluido dentro de otro relativamente quieto, con una densidad diferente debido a aspectos como la temperatura, contenidos de sales o contenido de material suspendido. Los cortos circuitos, se presentan cuando una porción del fluido atraviesa el tanque en un tiempo menor que el periodo de retención, debido a la diferencia de las velocidades y trayectorias de corriente (Romero Rojas, 2006).

Para el cálculo de la velocidad horizontal se parte de las siguientes relaciones (Arboleda Valencia, 2000).

$$Q = v_{SC}A_h \text{ y } Q = v_hA_v$$

$$A_h = aL \text{ y } A_v = ad$$

$$\frac{L}{d} = \frac{v_h}{v_{SC}}$$

Donde,

Q es caudal de entrada a la estructura (m³/d)

A_h es el área horizontal de la zona de sedimentación (m²)

A_v es el área vertical de la zona de sedimentación (m²)

d es la profundidad del tanque (m)

v_h es la velocidad horizontal (cm/s)

v_{sc} es la velocidad crítica de asentamiento (carga superficial)

L es la longitud de la zona de sedimentación

a es el ancho de la zona de sedimentación

Ecuación 3 Velocidad horizontal

En la práctica se usan relaciones de L/d que varían entre 5/1 y 25/1 (Arboleda Valencia, 2000). Por otra parte, para minimizar los fenómenos de cortocircuito y corrientes de densidad es recomendable que la velocidad horizontal este comprendida entre 0,25 y 1,5 cm/s (Romero Rojas, 2006).

1.2.1.1.5 Zonas de entrada y salida.

La entrada al sedimentador se diseña de tal forma que permita distribuir uniformemente el agua sobre el área transversal del tanque, esta zona es importante para controlar las corrientes de densidad e inercia, razón por la cual afecta la eficiencia del sedimentador (Romero Rojas, 2006). No obstante, ningún diseño de estructura de entrada a un sedimentador que se pueda considerar como ideal, cada diseño tendrá ventajas y desventajas que son particulares y deberán ser analizadas para cada caso en particular (Arboleda Valencia, 2000).

La salida del sedimentador busca dar una transición suave entre el tanque y el canal o tubería efluente, generalmente el nivel del agua de la estructura es controlado en la salida de la misma en algunos casos pueden ser aberturas o vertederos sumergidos con control manual ejercido por válvulas de control de entrada a los filtros, otras veces cuentan con mecanismos para ajustar y controlar el caudal de salida (Romero Rojas, 2006). El tipo de estructura escogida determina la mayor o menor porción de partículas, que pueden ser resuspendidas, a diferencia

de la estructura de entrada al tanque, que afecta toda la masa de agua, la salida sólo afecta la masa de agua que está al final del sedimentador (Arboleda Valencia, 2000). Por lo anterior, la carga unitaria del vertedero, debe mantenerse dentro de ciertos límites, normalmente se especifica un caudal comprendido entre los 1,67 y 3,3 l/s-m (Arboleda Valencia, 2000).

1.2.1.1.6 Zona de lodos.

Al diseñar el sedimentador, es necesario considerar el volumen destinado al almacenamiento de los lodos producidos en el proceso de sedimentación. Dichos lodos son generalmente movidos hidráulicamente, para tal fin los tanques sedimentadores tendrán pendientes longitudinal y transversal hacia la tolva entre el 2 - 3% y el 10 - 12% respectivamente (Romero Rojas, 2006).

Es necesario considerar que si la velocidad en el fondo del sedimentador es muy grande, las partículas decantadas tienden a ser resuspendidas y saldrán por el efluente disminuyendo la eficiencia del sedimentador (Arboleda Valencia, 2000). La velocidad teórica a partir de la cual pueden empezar a levantarse las partículas está dada por la Ecuación 4.

$$v_R = \sqrt{\frac{8K}{f} g(S_s - 1)D}$$

Donde,

v_R Es la velocidad de resuspensión (m/s)

K es un factor que varía entre 0,04 (partículas discretas) y 0,06 (partículas floculentas)

f factor de fricción de Darcy - Weisbach 0,02 - 0,03 (0,03 para arenas)

g es la fuerza de la gravedad (m/s^2)

D diámetro promedio de las partículas (m)

S_s Densidad relativa de las partículas

Ecuación 4 Velocidad de resuspensión

En general, la velocidad de arrastre varía entre 0,5 y 3,0 cm/s.

1.2.1.1.7 Resumen de parámetros de diseño sedimentadores convencionales.

Con el fin de resumir y presentar los criterios comúnmente usados en el diseño de los sedimentadores convencionales en la Tabla 5, se presentan algunos valores típicos para los parámetros de diseño de los mismos.

Tabla 5 Parámetros de diseño de sedimentadores convencionales

Parámetro	Valor	Observaciones	Referencia
Carga Superficial (m/d)	14 – 22	Floc de alumbre	AWWA
	18 – 27	Floc con Polímero	Smethurst (1979)
	37 – 44	Ablandamiento con cal	AWWA
	22 – 58	Agua fría flujo ascensional	AWWA
	58 – 88	Agua Cálida flujo ascensional	AWWA
	22 – 147	Ablandamiento, flujo ascensional	
	30 – 60		RAS98, Kawamura (2000)
	15 - 90		Insfopal
	20 - 60		Azevedo Netto
Tiempo de retención (horas)	15 – 30		RAS98, RAS2000
	2 – 4		AWWA, RAS98
Velocidad del flujo (cm/s)	1,5 – 4		RAS98, Kawamura (2000)
	0,25 – 1,5		AWWA
	0,5 – 1,8		Kawamura (2000)
	< 2		Smethurst (1979)
Mínimo de Tanques	< 1		RAS98, RAS2000
	2		RAS98, RAS2000
Profundidad del agua (m)	3 – 5		RAS98
	3 – 4,5		Kawamura (2000)
	4 – 5		RAS98, RAS2000
Descarga de lodos (h)	< 6		RAS98, RAS2000
Pendiente fondo (5)	> 2		RAS98, RAS2000
	> 0,4		Montgomery (1985)
Relación Long/Ancho	4/1 – 8/1		RAS98, RAS2000
	> 4/1		RAS98, Kawamura (2000)
	3/1 – 6/1		AWWA
Relación Long/Prof	5/1 – 25/1		RAS98, RAS2000
	> 15/1		RAS98, Kawamura (2000)
Tasa de rebose (L/s-m)	1,7 – 3,3		RAS98, RAS2000
	2,5 – 3,6		RAS98, Kawamura (2000)
	< 7,25	Clarificación	AWWA
	1,7 – 3,1	Floc de alumbre	AWWA
	3,1 – 3,7	Floc de ablandamiento	
	2 - 7		Insfopal (1970)

Fuente: Tomado de Purificación del agua, Jairo Albero Romero Rojas (2006)

1.2.2 Elementos generales de la dinámica de fluidos computacional

En los numerales anteriores se explicó el proceso de diseño de los sedimentadores, convencionales, corresponde a la determinación de parámetros tales como cargas superficiales, velocidades de flujo, relaciones geométricas entre otros que desconocen ciertas variables que afectan el funcionamiento de los tanques sedimentadores.

Al respecto Van Der Walt, menciona que el proceso convencional para el diseño de tanque sedimentadores se ve afectado por problemáticas como, i) el uso de valores promedio, ii) la falta de un criterio específico, para el diseño de la estructura de entrada al sedimentador y iii) el uso inapropiado de parámetros adimensionales, como los números de Reynolds y Froude como criterios para la estabilidad y funcionamiento de las estructuras de sedimentación.

En la actualidad se han desarrollado diferentes trabajos, aplicando la dinámica de fluidos computacional para el estudio del comportamiento de los tanques de sedimentación, los cuales han mostrado la utilidad de esta herramienta. No obstante lo anterior, la CFD no reemplazara por completo ni la experimentación física, ni el procedimiento convencional de diseño, pero si se convierte en una herramienta importante para la solución de problemas presentados en este tipo de estructuras (Goula A. , Kostoglou, Karapantsios, & Zouboulis, 2007).

Las ventajas de la CFD, es que no necesita asumir ningún parámetro, por el contrario, los modelos basados en CFD, pueden analizar directamente el comportamiento de los tanques sedimentadores (Van Der Walt, 2002). Sin embargo, no se debe olvidar que esto es una aproximación de la realidad y es objeto de simplificaciones para llevar a cabo las modelaciones (Van Der Walt, 2002), esto reitera lo mencionado anteriormente, la CFD y el diseño convencional deben convertirse en herramientas complementarias, pero no excluyentes.

1.2.2.1 Ecuaciones fundamentales del movimiento de fluidos.

El movimiento de fluidos está gobernado por tres ecuaciones fundamentales conocidas como: i) Ley de conservación de la masa, ii) Ley de conservación de la cantidad de movimiento o momento y por último iii) Ley de conservación de la energía. A continuación, se presentan las expresiones de las leyes fundamentales que gobiernan el flujo de fluidos.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{div}(\rho \vec{U}) = 0$$

Donde,

$\frac{\partial \rho}{\partial t}$ es la tasa de cambio de la densidad con respecto al tiempo por unidad de volumen

$\text{div}(\rho \vec{U})$ es el flujo neto de masa a través de la frontera del elemento

Ecuación 5 Ley de conservación de la masa

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \text{div}(\rho u U) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \text{div}(\mu \text{grad}(u)) + S_{Mx}$$

$$\frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + \text{div}(\rho v U) = -\frac{\partial p}{\partial y} + \text{div}(\mu \text{grad}(v)) + S_{My}$$

$$\frac{\partial(\rho w)}{\partial t} + \text{div}(\rho w U) = -\frac{\partial p}{\partial z} + \text{div}(\mu \text{grad}(w)) + S_{Mz}$$

Donde,

Los términos a la izquierda son las tasas de incremento de momento en x. y. z

respectivamente

Los términos a la derecha de la igualdad corresponden a la sumatoria de fuerzas actuantes sobre el volumen infinitesimal de fluido

S_{Mx} , S_{My} , S_{Mz} son términos que consideran las fuerzas de cuerpo, como la gravedad que actúan directamente sobre el volumen no sobre la superficie

Ecuación 6 Ley de conservación de momento (Ecuaciones de Navier – Stokes)

La expresión de la ley de la conservación de la energía, no se presenta ya que su aplicación no hace parte del presente estudio. La deducción de las ecuaciones presentadas, incluyendo también la referente a la conservación de la energía, puede ser consultada en Versteeg et al (2007) o en Anderson (1995) entre otros muchos autores.

1.2.2.2 Modelos de turbulencia.

La mayoría de los movimientos de fluidos que son de interés en la práctica de la ingeniería son turbulentos, por tal razón, el análisis del comportamiento del flujo turbulento, no es de interés netamente teórico (Versteeg & Malalasekera, 2007).

Considerando que para la mayoría de los propósitos de la ingeniería no se requiere resolver en detalle las fluctuaciones producidas por la turbulencia, la mayoría de los modelos realizados se han efectuado, basados en las ecuaciones del promedio temporal de Reynolds de las ecuaciones de Navier – Stokes (RANS por sus siglas en inglés) (Versteeg & Malalasekera, 2007).

Esta aproximación modifica las expresiones generales del movimiento de fluidos, siendo las nuevas relaciones las mostradas en la **Ecuación 7** cuya deducción puede ser consultada en los autores mencionados anteriormente.

$$\begin{aligned}
 \text{i)} \quad & \frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{div}(\rho \vec{U}) = 0 \\
 \text{ii)} \quad & \frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \text{div}(\rho u \vec{U}) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \text{div}(\mu \text{grad}(u)) + \left[\frac{\partial \overline{u'u'}}{\partial t} + \frac{\partial \overline{u'v'}}{\partial t} + \frac{\partial \overline{u'w'}}{\partial t} \right] + S_{Mx} \\
 \text{iii)} \quad & \frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + \text{div}(\rho v \vec{U}) = -\frac{\partial p}{\partial y} + \text{div}(\mu \text{grad}(v)) + \left[\frac{\partial \overline{u'v'}}{\partial t} + \frac{\partial \overline{v'v'}}{\partial t} + \frac{\partial \overline{v'w'}}{\partial t} \right] + S_{My} \\
 \text{iv)} \quad & \frac{\partial(\rho w)}{\partial t} + \text{div}(\rho w \vec{U}) = -\frac{\partial p}{\partial z} + \text{div}(\mu \text{grad}(w)) + \left[\frac{\partial \overline{u'w'}}{\partial t} + \frac{\partial \overline{v'w'}}{\partial t} + \frac{\partial \overline{w'w'}}{\partial t} \right] + S_{Mz}
 \end{aligned}$$

Donde,

\vec{U} es el vector de la velocidad promedio

p es la presión promedio

u' , v' , w' Son las fluctuaciones de la velocidad en los ejes x , y , z respectivamente

S_{Mx} , S_{My} , S_{Mz} son términos que consideran las fuerzas de cuerpo, como la gravedad que actúan directamente sobre el volumen, no sobre la superficie

Ecuación 7 Ecuaciones de Reynolds

Otras aproximaciones como la solución numérica directa o la simulación de grandes remolinos (DNS y LES por sus siglas en inglés), pueden ser utilizadas para los análisis con CFD. Sin embargo, son aproximaciones que demandan un alto recurso computacional (Versteeg & Malalasekera, 2007). Considerando esto, los análisis realizados en el presente estudio se llevan a cabo mediante la aproximación RANS, por lo cual se hace necesario el uso de modelos de turbulencia.

Existen varios modelos de turbulencia que se diferencian entre sí, por la cantidad de ecuaciones de transporte que agregan al sistema de ecuaciones de la aproximación RANS (Versteeg & Malalasekera, 2007), la Tabla 6 presenta los diferentes modelos utilizados en los programas de CFD.

Tabla 6 Modelos de turbulencia

Número de ecuaciones	Nombre modelo
Ninguna	Mixing Length model
Una	Spalart – Allmaras model
Dos	$k - \epsilon$ model
	$k - \omega$ model
	Algebraic stress model
Siete	Reynolds stress model

Fuente: Tomado de Versteeg Malalasekera (2007)

El modelo de turbulencia más común en las simulaciones de CFD, es el modelo estándar $k-\epsilon$, es ampliamente utilizado y validado (Versteeg & Malalasekera, 2007), desde su presentación por Launder y Spalding se ha convertido en uno de los modelos más usados para los análisis de fluidos en la ingeniería (ANSYS Inc., Ansys Fluent Theory Guide 14.5, 2016). Sin embargo, el modelo $k-\epsilon$ está concebido para números de Reynolds altos, razón por la cual es inadecuado para simular tanques de sedimentación con números de Reynolds bajos (Al-Sammaraee, Chan, Salim, & Mahabaleswar, 2009).

Variaciones del modelo estándar $k-\epsilon$, como el modelo *renormalization group* (RNG) han modificado la formulación original con el fin de subsanar sus debilidades, entre las cuales se puede destacar que el modelo RNG $k-\epsilon$, puede realizar análisis en problemas con números de Reynolds bajos, introduciendo consideraciones apropiadas en las zonas cercanas a las paredes, para garantizar la efectividad (ANSYS Inc., Ansys Fluent Theory Guide 14.5, 2016). El modelo RNG puede ser más acertado y confiable para un amplio rango de flujos que el estándar (ANSYS Inc., Ansys Fluent Theory Guide 14.5, 2016).

El segundo modelo de turbulencia de dos ecuaciones frecuentemente utilizado es el $k-\omega$ estándar, propuesto por Wilcox (Pope, 2000). Incorpora modificaciones para números de Reynolds bajos y compresibilidad entre otras (ANSYS Inc., Ansys Fluent Theory Guide 14.5, 2016). Variaciones del modelo $k-\omega$ como la propuesta por Menter (1994) denominado SST $k-\omega$, han combinado las fortalezas del modelo $k-\omega$ en las cercanías de las paredes, con las del modelo $k-\epsilon$ en la zona alejada de la capa límite (ANSYS Inc., Ansys Fluent Theory Guide 14.5, 2016).

El modelo Shear Stress Transport (SST) $k-\omega$ fue utilizado por Goula et al (2007), donde se estudió el comportamiento de un sedimentador circular de la planta de agua potable de Thessaloniki en Grecia, considerando que dicho modelo describe mejor los flujos con números de Reynolds bajos, como los presentes en un sedimentador (Goula A. , Kostoglou, Karapantsios, & Zouboulis, 2007). En el mencionado estudio fue validado con datos medidos experimentalmente, encontrando una buena correlación con los resultados de la modelación (Goula A. , Kostoglou, Karapantsios, & Zouboulis, 2007).

Con base en lo mencionado anteriormente, el modelo seleccionado para llevar a cabo los análisis objeto del presente estudio es el modelo SST $k-\omega$, el cual utiliza la energía cinética

turbulenta k y la frecuencia turbulenta ω , para completar el sistema de ecuaciones de la aproximación RANS. Las expresiones utilizadas por el modelo en mención se presentan a continuación.

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

Ecuación 8 Viscosidad de remolino

Los esfuerzos de Reynolds (Ecuación 9) son calculados de acuerdo con la expresión de Boussinesq como usualmente se realiza para los modelos de turbulencia de dos ecuaciones.

$$\tau_{ij} = \overline{\rho u'_i u'_j} = \mu_t \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \rho k \delta_{ij}$$

Ecuación 9 Esfuerzos de Reynolds

La expresión para el transporte de la energía cinética turbulenta para números de Reynolds altos está dada por la Ecuación 10

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \text{div}(\rho k U) = \text{div} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \text{grad}(k) \right] + P_k - \beta^* \rho k \omega$$

$$P_k = \left(2\mu_t S_{ij} \cdot S_{ij} - \frac{2}{3} \rho k \frac{\partial U_i}{\partial x_j} \delta_{ij} \right)$$

La expresión anterior se puede expresar como:

Tasa de cambio de k + Transporte de k por convección = Transporte de k por difusión turbulenta + tasa de producción de k (P_k) – tasa de disipación de k

Ecuación 10 Transporte de la energía cinética turbulenta (k)

La expresión de transporte para la frecuencia turbulenta está dada siguiente ecuación. (Ecuación 11).

$$\frac{\partial(\rho \omega)}{\partial t} + \text{div}(\rho \omega U) = \text{div} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_{\omega 1}} \right) \text{grad}(\omega) \right] + \gamma_2 P_\omega - \beta_2 \rho \omega^2 + 2 \frac{\rho}{\sigma_{\omega 2} \omega} \frac{\partial k}{\partial x_k} \frac{\partial \omega}{\partial x_k}$$

$$P_\omega = \left(2\mu_t S_{ij} \cdot S_{ij} - \frac{2}{3} \rho \omega \frac{\partial U_i}{\partial x_j} \delta_{ij} \right)$$

La expresión anterior se puede expresar como:

Tasa de cambio de ω + Transporte de ω por convección = Transporte de ω por difusión turbulenta +

tasa de producción de ω (P_k) – tasa de disipación de ω + difusión cruzada (término introducido por la mezcla de los modelos k- ω y k- ϵ)

Ecuación 11 Transporte de la frecuencia turbulenta (ω)

De acuerdo con Versteeg et al (2007), Menter en el 2003 introduce varias modificaciones al modelo SST k- ω para mejorar el funcionamiento del mismo basado en experiencias de su aplicación. Las principales mejoras introducidas son las siguientes:

- Constantes del modelo (Versteeg & Malalasekera, 2007)

$$\sigma_k = 1,0 \quad \sigma_{\omega 1} = 2,0 \quad \sigma_{\omega 2} = 1,17 \quad \gamma_2 = 0,44 \quad \beta_2 = 0,083 \quad \beta^* = 0,09$$

- Funciones de mezcla

Las funciones de mezcla son introducidas en las ecuaciones para realizar una suave transición entre los dos modelos (Versteeg & Malalasekera, 2007). Éstas pueden ser consultadas en la Guía Teórica de ANSYS Fluent (2012).

- Limitadores (Versteeg & Malalasekera, 2007)

La viscosidad de remolino, se limita para mejorar el funcionamiento del modelo en flujos con gradientes de presión adversos y zonas débiles. La producción de energía cinética turbulenta, se limita para evitar el desarrollo de turbulencia en zonas estancas. Los limitadores propuestos por Menter se presentan en las siguientes expresiones.

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

a_1 es una constante igual a 0,31 (ANSYS Inc., Ansys Fluent Theory Guide 14.5, 2016)

$$S = \sqrt{2 S_{ij} \cdot S_{ij}}$$

F_2 es una función de mezcla

Ecuación 12 Limitador de viscosidad de remolino

$$P_k = \min \left(10 \beta^* \rho k \omega, 2 \mu_t S_{ij} \cdot S_{ij} - \frac{2}{3} \rho k \frac{\partial U_i}{\partial x_j} \delta_{ij} \right)$$

Ecuación 13 Limitador de producción de energía cinética turbulenta

La explicación detallada de las expresiones antes mostradas se puede observar en Versteeg (2007) o en la Guía Teórica de Ansys Fluent (2012), ésta no se presenta en este trabajo por no ser del alcance del mismo. Así mismo, en el documento mencionado se puede observar las constantes utilizadas por Fluent para la aplicación del modelo SST k- ω , las cuales difieren de

las mostradas con anterioridad, pero se mantendrán iguales para los análisis del presente estudio.

1.2.2.3 Condiciones de frontera.

1.2.2.3.1 Condición de frontera de entrada (*velocity inlet*).

La condición de frontera para la entrada al dominio computacional más utilizada en la modelación hidráulica, es la condición *velocity inlet* (velocidad de entrada) (YAN, 2013), en la cual sólo es necesario conocer el área de la sección de entrada, y con una velocidad de entrada constante, se obtiene el caudal de entrada deseado (Claro, 2014). Esta condición implica un perfil de velocidad homogéneo en la entrada, que generalmente no corresponde con la realidad, razón por la cual en ocasiones se requiere alargar la entrada con el fin de obtener un perfil de velocidad completamente desarrollado (YAN, 2013).

Para el modelo de turbulencia k- ω es necesario suministrar las condiciones iniciales de k y ω . Lo óptimo es definir las basados en datos experimentales o en fórmulas empíricas, que tengan en cuenta la capa límite o el flujo turbulento completamente desarrollado a la entrada (ANSYS Inc., Ansys Fluent Theory Guide 14.5, 2016). Sin embargo, en la práctica, es común definir dichas variables a partir de otras cantidades más convenientes, como la intensidad turbulenta y el radio hidráulico. La intensidad turbulenta está definida por la **Ecuación 14**.

$$I = \frac{u'}{u_{avg}} = 0,16(Re)^{-\frac{1}{8}}$$

Donde,
u' es la media cuadrática de las fluctuaciones de la velocidad
u_{avg} es la velocidad promedio
Re es el número de Reynolds

Ecuación 14 Intensidad turbulenta

La longitud característica de la turbulencia o *turbulent length (l)*, es una cantidad relacionada con el tamaño de los grandes remolinos, que contienen la energía en los flujos turbulentos y está limitada por el tamaño del ducto. Una relación aproximada entre l y el tamaño del ducto es $l \approx 0,07L$ donde L es la dimensión característica del ducto que para tuberías se refiere al diámetro hidráulico dado por la siguiente expresión.

$$D_H = \frac{4A}{P}$$

Donde,
A es el área del ducto
P es el perímetro mojado del ducto
Para tuberías circulares el D_H es igual al diámetro D

Ecuación 15 Diámetro hidráulico

1.2.2.3.2 Condición de simetría (*symmetry*)

Es una de las condiciones más utilizadas para la modelación de la superficie libre en estructuras similares a los tanques de sedimentación (Dufresne, 2008). Esta condición estipula que no existe flujo a través de la interface considera que las variables al exterior son iguales a las del interior produciendo gradientes normales a la frontera nulos para todas las variables (Dufresne, 2008).

La principal ventaja de utilizar esta condición, es que no se requiere un modelo de varias fases (aire – agua) para considerar la superficie libre, reduciendo así el tiempo de cálculo. Para su aplicación es necesario conocer de antemano el nivel del agua en la estructura (Dufresne, 2008).

1.2.2.3.3 Condición de salida

De acuerdo con el tipo de problema analizado, se utilizan comúnmente dos tipos de condición para la frontera de salida, estas son *pressure outlet* y *outflow*. La primera de estas impone una presión para la salida, generalmente la presión atmosférica (Dufresne, 2008). La segunda se utiliza cuando las características del flujo como velocidad y presión no son conocidas antes de resolver el modelo (ANSYS Inc., Ansys Fluent Theory Guide 14.5, 2016).

Cuando se utiliza la condición *pressure outlet*, es necesario definir los parámetros del flujo de retorno o *backflow* para los flujos turbulentos, los cuales se definen de la misma manera que lo expresado para la condición de entrada. Otros parámetros pueden ser definidos para este tipo de condición, pero se escapan al alcance de este estudio, su explicación puede ser encontrada en la Guía del Usuario de ANSYS Fluent.

1.2.2.3.4 Condición de pared (*wall*)

La condición de frontera tipo pared, es la más utilizada para los problemas que involucran flujos confinados (Versteeg & Malalasekera, 2007). Generalmente, esta condición es modelada con la

condición de no deslizamiento (*no-slip*), que supone una velocidad tangencial a la frontera igual a cero (Versteeg & Malalasekera, 2007).

La condición de frontera mencionada con anterioridad, es apropiada para la simulación de paredes sólidas. En la cercanía de la pared el flujo es influenciado por los efectos de la viscosidad, la velocidad depende únicamente de la distancia y medida desde la pared, la densidad ρ , la viscosidad μ y el esfuerzo cortante τ_w , la **Ecuación 16** muestra la expresión de la velocidad promedio en cercanías de la pared sólida.

$$u^+ = \frac{U}{u_*} = f\left(\frac{\rho u_* Y}{\mu}\right) = f(y^+) \quad \text{Donde,}$$

$$u_* = \sqrt{\frac{\tau_w}{\rho}} \quad u_* \text{ es la velocidad de fricción o de corte}$$

Ecuación 16 Velocidad promedio en cercanías de la pared (ley de la pared)

La capa límite turbulenta, está dividida en dos regiones denominadas como exterior e interior. La primera se encuentra libre de los esfuerzos viscosos, la segunda se divide en tres zonas, la zona viscosa, la zona de transición y la zona turbulenta dominada por los esfuerzos turbulentos (Versteeg & Malalasekera, 2007).

En la zona viscosa, la cual es extremadamente delgada ($y^+ < 5$), el esfuerzo cortante es aproximadamente constante e igual al esfuerzo cortante de la pared y está dado por la siguiente expresión (Versteeg & Malalasekera, 2007).

$$\tau(y) = \mu \frac{\partial U}{\partial y} \cong \tau_w$$

Ecuación 17 Esfuerzo cortante en la zona viscosa

Integrando con respecto a y y aplicando la condición de frontera $U=0$ y $y=0$ se obtiene una relación lineal entre la velocidad promedio y la distancia a la pared, la cual es mostrada en la **Ecuación 18** (Versteeg & Malalasekera, 2007).

$$U = \frac{\tau_w y}{\mu}$$

Ecuación 18 Relación velocidad promedio y distancia a la pared

Con algo de algebra y aplicando las definiciones de u^+ y y^+ se puede deducir que $u^+=y^+$ (Versteeg & Malalasekera, 2007).

En la zona turbulenta, también conocida como el perfil logarítmico ($30 < y^+ < 500$) el esfuerzo cortante varía lentamente con respecto a la distancia de la pared, Schlichting en 1979 derivó una relación entre u^+ y y^+ para esta zona, dicha relación se presenta en la **Ecuación 19**.

$$u^+ = \frac{1}{k} \ln(y^+) + B = \frac{1}{k} \ln(Ey^+)$$

Donde

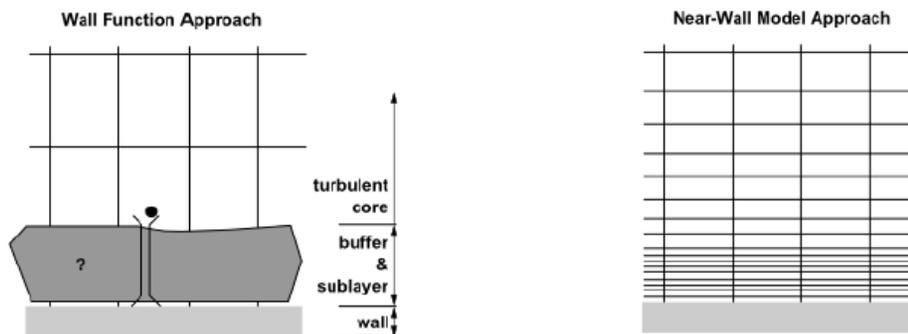
k es la constante de Von Karman $k = 0,4$

B es el término aditivo $B = 0,55$ o $E=9,8$

Ecuación 19 Relación u^+ y y^+ para la zona turbulenta (perfil logarítmico)

Existen dos metodologías para tratar la cercanía con la pared, las funciones de pared (Wall function approach) y el modelo de aproximación a la pared (near wall model approach), ésta última aproximación, modifica los modelos de turbulencia para permitir la solución de la zona viscosa, esta aproximación requiere que las mallas sean refinadas en la cercanías de la pared, para asegurar que el primer nodo de la malla se encuentre en la zona viscosa, lo que generalmente es difícil de lograr (YAN, 2013).

En cuanto a las funciones de pared, las zonas de la capa interna afectadas por la viscosidad no son resueltas, en cambio se utilizan fórmulas empíricas, para unir la zona afectada por la viscosidad con la zona de flujo turbulento completamente desarrollado (YAN, 2013), evitando la necesidad de modificar los modelos de turbulencia para analizar la zona viscosa. La Figura 1 muestra la diferencia entre las dos aproximaciones mencionadas con anterioridad.



Tomado de la Guía teórica de ANSYS FLUENT.

Figura 1 Tipos de aproximación para cercanías a la pared (Ansys 2016)

La condición de pared, para la energía cinética turbulenta k en el modelo SST $k-\omega$, es tratada de la misma manera que se efectúa para esta variable en el “tratamiento de pared mejorado” para el modelo $k-\epsilon$, esto significa que las condiciones de frontera dependerán de la calidad de la malla utilizada, es decir que para mallas “gruesas” el modelo utilizará las funciones de pared y para las mallas finas se utilizará la condición de frontera adecuada para números Reynolds bajos (ANSYS Inc., Ansys Fluent Theory Guide 14.5, 2016).

En el tratamiento de pared mejorado en FLUENT, utiliza una función de empalme entre las leyes lineal y logarítmica creando una única ley de la pared para toda la región en proximidades de la pared, esto lo logra usando la función sugerida por Kader mostrada en la Ecuación 20 (ANSYS Inc., Ansys Fluent Theory Guide 14.5, 2016).

$$u^+ = e^{\Gamma} u_{lam}^+ + e^{\frac{1}{\Gamma}} u_{turb}^+$$

La función de mezcla está dada por
 $\Gamma = -\frac{a(u^+)^4}{1+by^+}$ donde $a = 0.01$ y $b = 5$

Ecuación 20 Ecuación de mezcla propuesta por Kader

De manera similar la ecuación para la derivada $\frac{du^+}{dy^+}$ está dada por la Ecuación 21 (ANSYS Inc., Ansys Fluent Theory Guide 14.5, 2016).

$$\frac{du^+}{dy^+} = e^{\Gamma} \frac{du_{lam}^+}{dy^+} + e^{\frac{1}{\Gamma}} \frac{du_{turb}^+}{dy^+}$$

Ecuación 21 Ecuación de mezcla propuesta por Kader

Esta aproximación permite que la ley de la pared completa sea modificada, para tener en cuenta efectos como gradientes de presión o propiedades variables. También asegura el comportamiento asintótico para valores grandes y pequeños de y^+ y una representación razonable de los perfiles de velocidad para los valores de y^+ comprendidos entre $3 < y^+ < 10$ (ANSYS Inc., Ansys Fluent Theory Guide 14.5, 2016).

En cuanto a la frecuencia turbulenta, el valor en la pared está dado por (ANSYS Inc., Ansys Fluent Theory Guide 14.5, 2016).

$$\omega_W = \frac{\rho(u^*)^2}{\mu} \omega^+$$

Ecuación 22 Valor de ω en la pared

La Ecuación 22 puede ser resuelta analíticamente, para la subcapa laminar y para la región logarítmica de acuerdo con las ecuaciones mostradas a continuación (ANSYS Inc., Ansys Fluent Theory Guide 14.5, 2016).

$$\omega^+ = \frac{6}{\beta_i(y^+)^2}$$

Ecuación 23 Solución de ω para la subcapa laminar

$$\omega^+ = \frac{1}{\sqrt{\beta_\infty^*}} \frac{du_{turb}^+}{dy^+}$$

Ecuación 24 Solución de ω para zona logarítmica

Con base en lo anterior, se puede definir un tratamiento de pared para ω que cambiará automáticamente de la formulación de la subcapa viscosa a las funciones de pared, dependiendo de la calidad de la malla utilizada (ANSYS Inc., Ansys Fluent Theory Guide 14.5, 2016).

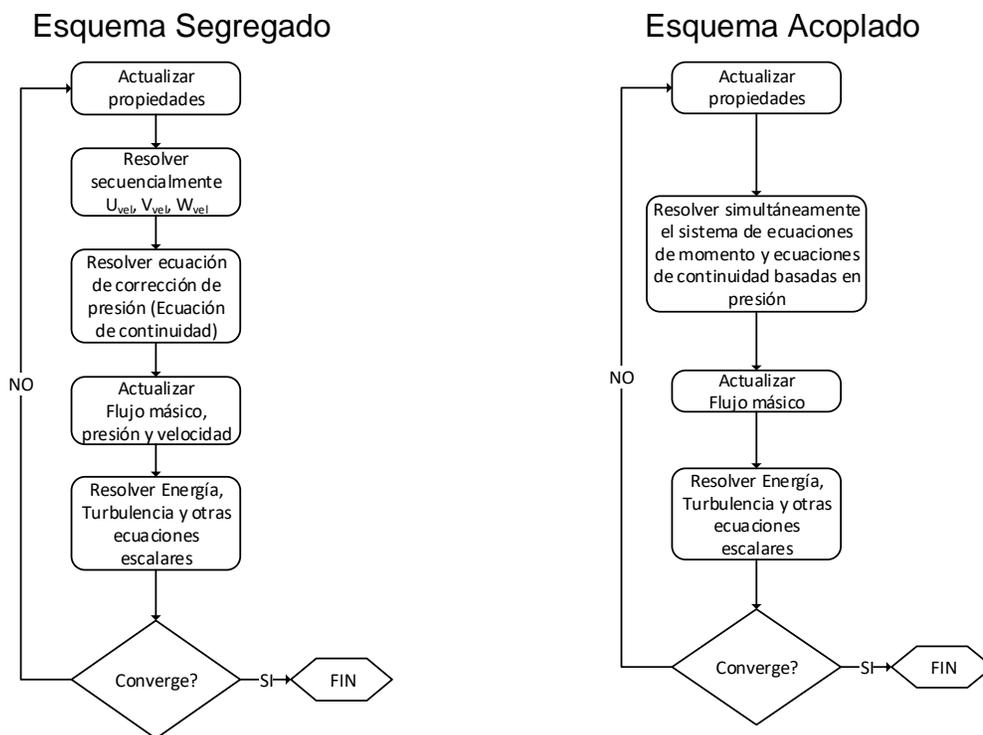
1.2.2.4 Métodos de solución.

1.2.2.4.1 Esquema adoptado para la solución.

ANSYS FLUENT, permite la solución de las ecuaciones fundamentales del movimiento de fluidos discretizadas mediante el uso de la metodología del volumen finito por medio de dos esquemas, el primero basado en la presión o Pressure-based y el segundo basado en la densidad o Density-based. El primero es comúnmente utilizado para la solución de problemas con flujos incompresibles o medianamente compresibles, mientras el otro fue inicialmente diseñado para flujos compresibles con altas velocidades (ANSYS Inc., Ansys Fluent Theory Guide 14.5, 2016). En la actualidad los dos métodos pueden ser utilizados para la solución de un amplio rango de problemas, sin embargo, en algunos casos uno puede llegar a funcionar mejor que el otro, más información al respecto puede encontrarse en la Guía Teórica de ANSYS.

Para este caso en particular se utilizará el Pressure-based Solver considerando que se trata de un flujo incompresible, este permite resolver los problemas mediante dos esquemas, el segregado y el acoplado.

Con el uso de cualquiera de estos esquemas, el programa resolverá las ecuaciones fundamentales de conservación de la masa y conservación de movimiento y cuando es necesario las ecuaciones de los escalares como la energía, la turbulencia entre otros. En ambos casos se utiliza el método del volumen de control, siguiendo la metodología expuesta a continuación:



Tomado de la Guía teórica de ANSYS FLUENT.

Figura 2 Diagramas de flujo de los esquemas segregado y acoplado

El esquema o algoritmo segregado, resuelve cada una de las ecuaciones fundamentales una después de la otra, cada una de las ecuaciones es desacoplada o segregada de la otra (de allí el nombre). Este algoritmo es eficiente en el uso de la memoria, ya que las ecuaciones discretizadas sólo se almacenan una a la vez en la memoria, no obstante lo anterior, la convergencia es relativamente lenta, ya que las ecuaciones se resuelven de manera desacoplada (ANSYS Inc., Ansys Fluent Theory Guide 14.5, 2016).

Por otra parte, el algoritmo acoplado resuelve un sistema acoplado de ecuaciones, comprendido por las ecuaciones de momento y las ecuaciones de continuidad. En este esquema la convergencia de la solución se mejora de manera significativa, pero el costo computacional puede incrementarse entre 1.5 y 2 veces más en comparación con el algoritmo segregado ya que las ecuaciones de continuidad se deben almacenar en la memoria mientras se resuelven los campos de velocidad y presión (ANSYS Inc., Ansys Fluent Theory Guide 14.5, 2016).

Dadas las limitaciones computacionales con base en las cuales se desarrolla el presente trabajo, se escogió el esquema segregado para llevar a cabo las simulaciones objeto de este estudio.

1.2.2.4.2 Discretización espacial gradientes.

Para la discretización de los gradientes ANSYS FLUENT ofrece tres métodos enunciados a continuación:

- Green-Gauss basado en celdas
- Green-Gauss basado en nodos
- Mínimos cuadrados basado en celdas

El método Green-Gauss basado en celdas, calcula el gradiente de un escalar en el centro de la celda como el promedio aritmético de los valores en los centros de las celdas adyacentes. A diferencia, el Green-Gauss basado en nodos realiza el mismo cálculo, pero como el promedio de los valores en los nodos de la celda (ANSYS Inc., Ansys Fluent Theory Guide 14.5, 2016).

El método de los mínimos cuadrados, realiza el gradiente de la celda mediante un sistema lineal de ecuaciones que se resuelve mediante el proceso de Gram-Schmidt, más información al respecto puede ser encontrada en la guía teórica del software.

El método de Green-Gauss basado en nodos, es más preciso que el basado en celdas particularmente en mallas irregulares y no estructuradas, pero es relativamente más costoso computacionalmente (ANSYS Inc., Ansys Fluent Theory Guide 14.5, 2016). Por otra parte, la precisión del esquema los mínimos cuadrados basado en celdas, es comparable con la del Green-Gauss basado en nodos, pero con un costo computacional menor lo que lo hace la

selección por defecto en ANSYS FLUENT (ANSYS Inc., Ansys Fluent Theory Guide 14.5, 2016).

1.2.2.4.3 Discretización para términos convectivos.

ANSYS FLUENT, permite la selección del método de discretización para los términos convectivos de las ecuaciones fundamentales, estos métodos se enuncian a continuación:

- Método de primer orden upwind
- Método de segundo orden upwind
- Power Law
- QUICK
- Método de tercer orden MUSCL

Cuando el flujo está alineado con la malla, la discretización de primer orden upwind puede ser aceptable. Cuando esto no ocurre se pueden obtener mejores resultados con el método de segundo orden upwind. Generalmente, el esquema de primer orden upwind tiene una mejor convergencia que el de segundo orden, pero conlleva a resultados menos precisos (ANSYS Inc., Ansys Fluent Theory Guide 14.5, 2016).

Con la aplicación de los esquemas QUICK y de tercer orden MUSCL, se puede llegar a obtener resultados más precisos que el método de segundo orden con flujos rotacionales o en espiral. La discretización con el esquema QUICK, se puede aplicar para mallas cuadrilaterales o de hexaedros mientras el MUSCL es aplicable a todo tipo de malla. En general el método QUICK no genera un aumento significativo en la precisión de la que se obtiene con el esquema de segundo orden, razón por la cual este último suele ser suficiente (ANSYS Inc., Ansys Fluent Theory Guide 14.5, 2016).

Por defecto, para flujos monofásicos se utilizan el esquema de segundo orden upwind, para los términos convectivos y los escalares excepto para las ecuaciones de referentes a la turbulencia que son resueltos mediante el esquema de primer orden upwind (ANSYS Inc., Ansys Fluent Theory Guide 14.5, 2016).

Otro esquema de discretización denominado Power Law está disponible, pero de acuerdo con la documentación de ANSYS FLUENT este tendrá la misma precisión que el método de primer orden upwind.

1.2.2.4.4 Esquema de interpolación de la presión.

ANSYS FLUENT, ofrece varias alternativas para la interpolación de la presión, por defecto el esquema estándar (standard), el cual es captable para la mayoría de problemas que se analizan, sin embargo, el estudio de ciertos tipos de flujos se puede beneficiar de otros esquemas (ANSYS Inc., Ansys Fluent Theory Guide 14.5, 2016).

- El análisis de flujos en los que intervienen grandes fuerzas de cuerpo, el esquema recomendado es el body-force-weighted.
- Para análisis de flujos en espiral, rotacionales de alta velocidad, convección natural y flujos con números de Rayleigh altos, es recomendable utilizar el esquema PRESTO
- Para flujos compresibles, el esquema de segundo orden es recomendable, este último puede ser utilizado para mejorar la precisión, cuando alguno de los otros esquemas no es aplicable

1.2.2.4.5 Método de acople Presión – Velocidad.

Como se mencionó anteriormente para las simulaciones que se llevan a cabo en el presente trabajo, se solucionaran mediante la aplicación del solucionado basado en la presión en el esquema segregado. ANSYS FLUENT proporciona tres métodos segregados para el acople de presión-velocidad enunciados a continuación:

- SIMPLE (Semi implicit Method for Pressure Linked Equations)
- SIMPLEC (SIMPLE-consistent)
- PISO (Pressure Implicit with Splitting of Operators)

Las simulaciones estáticas, utilizan generalmente los métodos SIMPLE o SIMPLEC mientras que las simulaciones no estáticas o aquellas con mallas muy sesgadas se resuelven con PISO (ANSYS Inc., Ansys Fluent Theory Guide 14.5, 2016).

Aunque los dos métodos SIMPLE y SIMPLEC están disponibles, muchos problemas se pueden ver beneficiados del uso de SIMPLEC, ya que permite el incremento de los factores de relajación lo que conlleva a una convergencia más rápida.

1.2.2.5 Simulación del transporte de partículas.

Actualmente existen dos aproximaciones para la simulación de flujos multifásicos: La aproximación Euler – Lagrange y la aproximación Euler – Euler (ANSYS Inc., Ansys Fluent Theory Guide 14.5, 2016).

- En la aproximación Euler – Lagrange: La fase líquida es modelada como medio continuo, resolviendo las ecuaciones de Navier – Stokes. Un gran número de partículas individuales es modelado para la fase discreta o dispersa. Esta fase puede intercambiar cantidad de movimiento (momentum), masa y energía con la fase continua. Teniendo en cuenta que, en este modelo se realiza el cálculo para cada partícula o grupo de éstas que se asume, siguen las mismas trayectorias, el modelo está limitado para sistemas con baja concentración de la fase discreta (Andersson, Andersson, Hakasson, Mortensen, & Van Wachen, 2012). La aproximación Euler – Lagrange no necesita ecuaciones adicionales de cierre para la fase discreta ya que éste sigue el movimiento de cada partícula individualmente, lo que lo hace conveniente para la consideración de propiedades como densidad, granulometría, velocidad de asentamiento, entre otras (ANSYS Inc., Ansys Fluent Theory Guide 14.5, 2016).
- Modelo Euler – Euler: Las diferentes fases son tratadas como continuas y para cada una de éstas se resuelven las ecuaciones de momentum y continuidad. Este modelo puede manejar flujos complejos, pero no siempre da los mejores resultados, ya que se requiere información empírica para poder cerrar el sistema de ecuaciones (Andersson, Andersson, Hakasson, Mortensen, & Van Wachen, 2012). En ANSYS FLUENT se encuentran los siguientes modelos de esta aproximación:
 - Modelo de mezcla o algebraico (mixture model): En este modelo se asume una fuerte interacción entre las fases y no es necesario resolver los balances de momentum, para cada una de las fases separadamente. La viscosidad es estimada para la mezcla de las fases, la velocidad de las diferentes fases se calcula con base en fuerzas, como la de arrastre que dan velocidades relativas con respecto a la velocidad media de la mezcla (Andersson, Andersson, Hakasson, Mortensen, & Van Wachen, 2012).
 - Modelo de volumen de fluido (VOF por sus siglas en inglés): Es un modelo Euler – Euler donde la interface entre las distintas fases es calculada (Andersson, Andersson, Hakasson, Mortensen, & Van Wachen, 2012).

- Modelo Euleriano (Eulerian model): Es el modelo más complejo de los modelos multifásicos. En ANSYS FLUENT, este modelo resuelve un número n de ecuaciones de momento y continuidad para cada una de las fases

Los modelos multifásicos, se modelan ya sea utilizando la aproximación Euler – Euler o la Euler – Lagrange dependiendo del grado de acople entre cada una de las fases considerando que la aproximación Euler – Euler se utiliza para modelos de flujos con partículas con concentraciones superiores al 10% (YAN, 2013).

Estudios preliminares comparando los modelos multifásicos presentes en ANSYS FLUENT fueron realizados por Laïly en 2012 (YAN, 2013), con el fin de identificar la mejor aproximación. El modelo Eulerian – Granular, Modelo de mezcla y el modelo de fase discreta desacoplado, fueron evaluados con un trazador en un canal rectangular, los resultados mostraron que el modelo de fase discreta desacoplado es mejor representando la dispersión y el proceso de mezcla en canales rectangulares.

Adicionalmente, aunque la aproximación Euler – Lagrange puede considerar la interacción entre partículas el modelo se simplifica considerablemente cuando estos efectos pueden ser obviados (ANSYS Inc., Ansys Fluent Tutorial Guide 14.5, 2016). Considerando que la concentración de partículas en un sedimentador de agua potable es generalmente baja, razón por la cual se puede asumir que las partículas no afectan el campo de flujo (Goula A. , Kostoglou, Karapantsios, & Zouboulis, 2007), se considera adecuado para la utilización en el análisis de los sedimentadores objeto del presente estudio. En ANSYS FLUENT, la simulación del transporte de partículas mediante la aproximación Euler – Lagrange se efectúa mediante el modelo de fase discreta o DPM por sus siglas en inglés.

En el modelo DPM, la trayectoria de las partículas se predice a partir del balance de fuerzas sobre la partícula, este balance de fuerzas en la dirección x se puede escribir como se muestra en la Ecuación 25 (ANSYS Inc., Ansys Fluent Tutorial Guide 14.5, 2016).

$$\frac{du_p}{dt} = F_D(u - u_p) + \frac{g_x(\rho_p - \rho)}{\rho_p} + F_x$$

Donde \vec{u} es la velocidad del fluido, \vec{u}_p es la velocidad de la partícula μ es la viscosidad del fluido, ρ y ρ_p son las densidades del fluido y de la partícula respectivamente.

Ecuación 25 Balance de fuerzas sobre la partícula (dirección x) modelo DPM

El término a la izquierda de la ecuación es la aceleración (en la dirección x) de la partícula por unidad de masa, el primer término de la parte derecha de la ecuación, representa la fuerza de arrastre por unidad de masa de la partícula, el segundo término representa la fuerza de la gravedad y el tercero se refiere a otras fuerzas que pueden ser importantes en especiales circunstancias (ANSYS Inc., Ansys Fluent Tutorial Guide 14.5, 2016). En cuanto a la fuerza de arrastre el término F_D está dado por la Ecuación 26.

$$F_D = \frac{18\mu C_D Re}{\rho_p d_p^2} \frac{1}{24}$$

Donde
Re es el número de Reynolds relativo a la partícula y está dado por:

$$Re = \frac{\rho d_p |\vec{u}_p - \vec{u}|}{\mu}$$

Ecuación 26 Coeficiente F_D

El coeficiente de arrastre en Fluent, está dado por la expresión propuesta en 1972 por Morsi y Alexander aplicable a partículas de forma esférica y puede ser aplicada en un amplio rango de números de Reynolds Re. La expresión mencionada está dada por la Ecuación 27.

$$C_D = \alpha_1 + \frac{\alpha_2}{Re_p} + \frac{\alpha_3}{Re_p^2}$$

Donde
Las constantes $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ son empíricas y dependen del número de Reynolds de la partícula y se presentan en la siguiente tabla tomada Yan 2012.

Ecuación 27 Coeficiente de arrastre (Morsi y Alexander)

Tabla 7 Constantes de coeficiente de arrastre (Morsi y Alexander 1972)

Re_p	a_1	a_2	a_3
$Re_p < 0.1$	0	24	0
$0.1 < Re_p < 1$	3.69	22.73	0.0903
$1 < Re_p < 10$	1.222	29.1667	-3.8889
$10 < Re_p < 100$	0.6167	46.15	-116.67
$100 < Re_p < 1000$	0.3644	98.33	-2778
$1000 < Re_p < 5000$	0.357	148.62	-4.75e+4
$5000 < Re_p < 10000$	0.46	490.546	5.787e+5
$Re_p > 10000$	0.5191	-1662.5	5.4167e+6

1.2.2.6 Simulación de los efectos de la turbulencia en el transporte de partículas.

La necesidad de considerar los efectos de la turbulencia en el transporte de partículas, se encuentra dividida entre diferentes autores. Investigadores como Wilkinson y Waldie en 1994 y

Petterson en 1997, argumentan que la trayectoria de la partícula puede calcularse con base en la velocidad media del flujo sin considerar la influencia de las fluctuaciones del flujo debidas a la turbulencia (YAN, 2013). Otros autores como Thomson en 1984, Stovin y Saul en 2000, Shams et al en 2002, Dufresne en 2008 y 2009, Adamsson et al en 2012, Yan et al en 2011 afirman que la dispersión de las partículas más pequeñas es afectada por el flujo turbulento (YAN, 2013).

En ANSYS FLUENT, la dispersión de partículas puede ser considerada usando el modelo estocástico o el modelo de nubes de partículas, el primero de estos tiene en cuenta los efectos instantáneos de las fluctuaciones de la turbulencia sobre las partículas, a través de modelos estocásticos; el segundo rastrea la evaluación estadística de una nube de partículas con respecto a una trayectoria media.

Para el caso en estudio, se utilizará modelo estocástico de camino aleatorio (Discrete Random Walk Model), incluido en ANSYS FLUENT el cual simula la interacción de las partículas con una sucesión de remolinos turbulentos, cada uno de éstos caracterizado por una fluctuación turbulenta la cual sigue una distribución Gaussiana u' , v' y w' , un tiempo característico τ_e (tiempo de vida del remolino) y una longitud característica L_e . Las fluctuaciones de velocidad están dadas por las siguientes ecuaciones (YAN, 2013).

$$\begin{aligned} u' &= \sqrt{u'^2} \\ v' &= \sqrt{v'^2} \\ w' &= \sqrt{w'^2} \end{aligned} \quad \begin{array}{l} \text{Donde} \\ \xi \text{ Es un número aleatorio con una distribución} \\ \text{normal y } k \text{ es la energía cinética turbulenta.} \end{array}$$

$$\sqrt{u'^2} = \sqrt{v'^2} = \sqrt{w'^2} = \xi \sqrt{\frac{2k}{3}}$$

Ecuación 28 Fluctuaciones de velocidad turbulenta

Las fluctuaciones de velocidad prevalecen en el tiempo durante el tiempo de vida de los remolinos, el cual es calculado por la Ecuación 29.

$$\tau_e = 2T_L$$

Ecuación 29 Tiempo de vida característico de los remolinos

Para partículas pequeñas moviéndose con el fluido el tiempo integral de la partícula se convierte en el tiempo integral lagrangiano el cual está dado por la Ecuación 30.

$$T_L = \frac{C_L}{\omega}$$

Donde
CL es la constante del tiempo característico a ser determinado por ese modelo.

Ecuación 30 Tiempo integral lagrangiano

Otra opción para el cálculo del tiempo de vida de los remolinos de forma aleatoria, está dada por una variación log-normal de acuerdo con la Ecuación 31. Esta aproximación conlleva a resultados más realistas (ANSYS Inc., Ansys Fluent Tutorial Guide 14.5, 2016).

$$\tau_e = -T_L \log(R)$$

Donde
R es un número aleatorio entre 0 y 1.

Ecuación 31 Tiempo de vida de los remolinos (opción de cálculo)

El tiempo de viaje de las partículas a través de los remolinos está dado por la Ecuación 32.

$$t_{cross} = -\tau \ln \left(1 - \left(\frac{L_e}{\tau |u - u_p|} \right) \right)$$

$$\tau = \frac{\rho_p d^2}{18\mu}$$

Donde
 τ es el tiempo de relajación de la partícula
Le es la longitud característica del remolino
 $|u - u_p|$ es la magnitud de la velocidad relativa

Ecuación 32 Tiempo de viaje de la partícula en remolino

En este modelo se asume que las partículas, interactúan con los remolinos del fluido durante el menor de los tiempos, entre el tiempo de vida del remolino o el tiempo de viaje de la partícula a través del remolino. Cuando uno de estos dos tiempos es alcanzado se calcula un nuevo valor de la velocidad instantánea aplicando un nuevo valor de ξ en la Ecuación 28.

La dispersión de las partículas utiliza el concepto del tiempo integral, que describe el tiempo que la partícula gasta en el movimiento turbulento a lo largo de la trayectoria. El tiempo integral T está dado por la Ecuación 33.

$$T = \int_0^{\infty} \frac{\overline{u'_p(t)u'_p(t-s)}}{\overline{u_p'^2}} ds$$

El tiempo integral es proporcional a la tasa de dispersión de la partícula, a mayor valor existe un mayor movimiento turbulento en el flujo. Se puede observar que la difusividad está dada por $\overline{u'_i u'_j T}$

Ecuación 33 Tiempo integral

1.2.2.7 Condiciones de frontera para la fase discreta.

1.2.2.7.1 Análisis de partículas.

El desarrollo del presente trabajo se realizó de manera teórica, debido a que no se contó con la posibilidad de realizar mediciones en plantas de tratamiento de agua potable existentes en el país, ni tampoco se encontraron estudios realizados al interior de Colombia sobre la distribución del tamaño de los flocs, de acuerdo con un tipo de coagulante.

Considerando lo anterior, se recurrió a estudios realizados en el exterior, en los cuales se analizara el tamaño de los flocs producidos, durante el proceso de floculación en el tratamiento de agua para consumo humano.

Varios investigadores han realizado estudios sobre la distribución de los tamaños de los flóculos producidos durante el proceso de floculación, Goula et al (2007), efectuaron un estudio para la optimización de un sedimentador, dentro de este estudio se realizaron muestreos del afluente y el efluente, las muestras fueron posteriormente analizadas mediante la técnica de difracción de láser, para obtener la distribución de tamaños de los flocs; para la simulación, el rango total de partículas fue dividido en trece clases distintas, cada una representada por un diámetro promedio (asumiendo la esfericidad de las partículas), a partir de las cuales se evaluó la eficiencia de la estructura estudiada.

Yi Geng (2005), estudió la distribución de los tamaños de los flocs para distintos coagulantes (PAC y sulfato de aluminio) y diferentes dosis de los mismos, con el fin de analizar el químico y dosificación óptima, para la potabilización del agua de consumo humano, en la población de Tataskweyak Cree Nations Community ubicada en Manitoba – Canadá. Este estudio se realizó con base en ensayos de jarras y análisis, por medio de un microscopio para realizar la medición y el conteo de las partículas. Como resultado de este estudio, se obtuvieron diferentes distribuciones de tamaños de flocs de acuerdo con las dosis de coagulantes.

En 2015 Sun et al, caracterizaron la distribución del tamaño de los flocs a partir de un proceso de floculación con PACI, mezclada en un agua sintética elaborada para el estudio. En este estudio se aplicó una metodología para obtener la distribución de tamaños, que consideraba los vacíos al interior de los flocs formados.

De los estudios anteriores, sólo el desarrollado por Goula et al (2007), fue llevado a cabo con mediciones directas sobre un sistema de tratamiento existente, tomando muestras sobre el afluente y efluente del sedimentador, sin recurrir a ensayos indirectos de jarras para determinar la distribución de los floc. Adicionalmente, este estudio contó con la medición real de la cantidad de masa a la entrada de la estructura de sedimentación analizada.

Con base en lo anterior y considerando que el trabajo desarrollado es de carácter teórico, se asumieron los resultados obtenidos en el estudio de Goula et al (2007), como punto de partida para los análisis que se presentan en este trabajo.

1.2.2.7.2 Condiciones de entrada y salida

A partir de los resultados obtenidos por Goula et al (2007), se definieron los tamaños de partículas que se inyectaran en la estructura para analizar la eficiencia de un sedimentador convencional. Utilizando las opciones que ofrece en la actualidad FLUENT de ANSYS, se utilizó el método de distribución de diámetros de Rosin Rambler, para representar la entrada de partículas en el sedimentador similar a lo efectuado por Yan en 2013.

La distribución de Rosin – Rambler es una distribución empírica propuesta por Rosin y Rambler en 1933 y de acuerdo con ésta, la masa de las partículas mayores a d está dada por:

$$Y_d = e^{-(d/\bar{d})^n}$$

Donde:

Y_d es la masa acumulada mayor a d

\bar{d} es la constante de tamaño

n es el parámetro de distribución

Ecuación 34 Distribución de Rosin Rambler

Para hacer uso de la distribución de Rosin Rambler, las partículas se dividen en clases, cada una representada por un valor promedio, para realizar los cálculos de la trayectoria. Para el caso en estudio se asumieron los datos obtenidos por Goula et al, los cuales se presentan a continuación.

Tabla 8 Datos partículas asumidas para el análisis

Clase	Rango (μm)	d (μm)	Fracción masa
1	10 - 30	20	0.025
2	30 - 70	50	0.027
3	70 - 90	80	0.039
4	90 - 150	120	0.066
5	150 - 190	170	0.095
6	190 - 210	200	0.115
7	210 - 290	250	0.126
8	290 - 410	350	0.124
9	410 - 490	450	0.113
10	490 - 610	550	0.101
11	610 - 690	650	0.077
12	690 - 810	750	0.057
13	810 - 890	850	0.040

Inicialmente se graficaron los datos plasmados en la tabla anterior, a partir de estos se obtuvo \bar{d} cuyo valor se calcula igualando $Y_d = e^{-1} = 0.368$ (ANSYS Inc., Ansys Fluent Theory Guide 14.5, 2016), el valor de n, se obtiene del promedio del cálculo de este parámetro para cada una de las clases, mediante el uso de la siguiente ecuación.

$$n = \frac{\ln(-\ln Y_d)}{\ln(d/\bar{d})}$$

Donde:

Y_d es la masa acumulada mayor a d

\bar{d} es la constante de tamaño

n es el parámetro de distribución

Ecuación 35 Parámetro de distribución

Los valores obtenidos para el diámetro promedio y el parámetro de distribución son 363.38 μm y 1.55 respectivamente, con base en estos datos se graficó la distribución de tamaños de las partículas de acuerdo con la metodología de Rosin Rambler, los datos y la distribución obtenida se presentan en la Figura 3 en la cual se puede observar el ajuste obtenido.

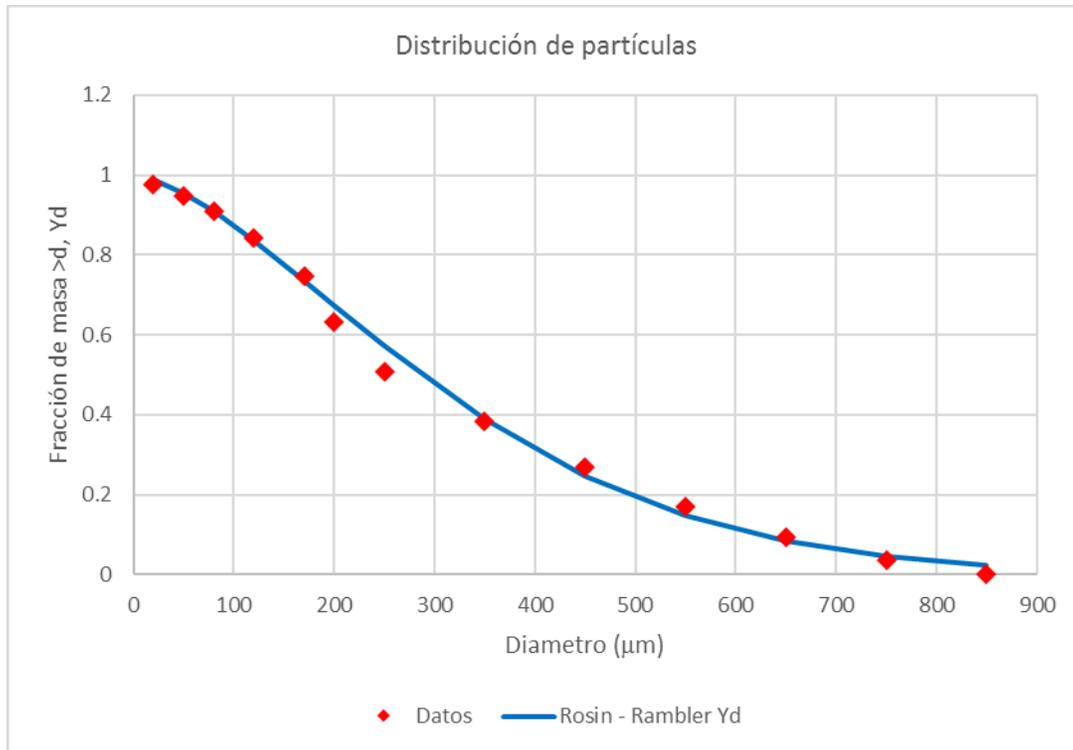


Figura 3 Gráfica de datos y distribución de Rosin - Rambler

Con base en lo anterior, se realizó la creación de la inyección de las partículas al dominio computacional establecido para la estructura de sedimentación. FLUENT, ofrece varios tipos de inyección denominados como se enuncia a continuación.

- Single: Permite la inyección de una partícula.
- Group: Permite la inyección de un grupo de partículas.
- Cone: Sólo en 3D, inyecta partículas formando un cono.
- Surface: Inyección de las partículas a través de toda la superficie.
- File: Inyección de partículas de acuerdo con un archivo establecido por el usuario.

Para el caso en estudio se utilizó la inyección tipo Surface (superficie), ya que se asume que la entrada de los flocs al sedimentador por cada uno de los orificios se realiza de manera homogénea.

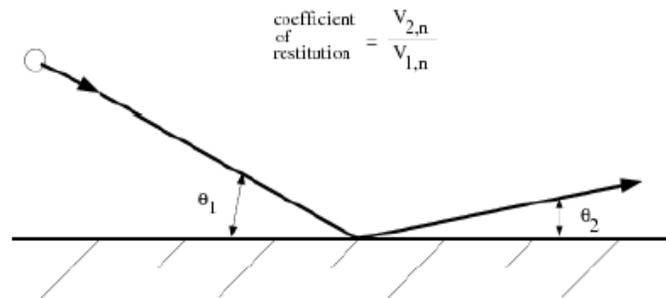
En los numerales posteriores se describen las condiciones de frontera para las paredes y el fondo de la estructura, se aclara que si una partícula alcanza la salida de la estructura se considera como “escapada” y por lo tanto el cálculo de la trayectoria finaliza, por esta razón la condición para las partículas en la salida del dominio computacional es “escaped”.

1.2.2.7.3 Condiciones de frontera para el fondo y paredes.

En FLUENT, cuando se simula el transporte, es necesario definir el comportamiento que cada partícula seguirá cuando alcanza determinada frontera del dominio computacional, razón por la cual es necesario estipular las condiciones de frontera para las partículas simuladas.

ANSYS FLUENT, cuenta con unas condiciones de frontera predeterminadas para la simulación de partículas mediante el modelo de fase discreta, las cuales se resumen a continuación.

Reflejar: Esta condición hace que la partícula rebote en la frontera con un cambio en su momento, de acuerdo con el coeficiente de restitución.



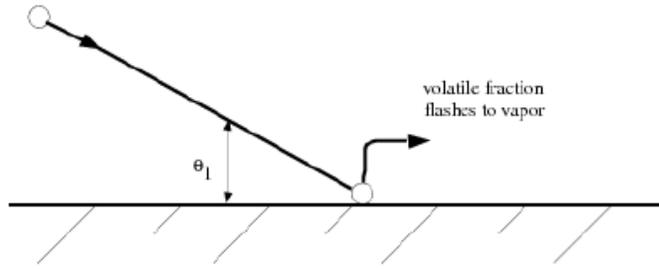
Tomado de la Guía teórica de ANSYS FLUENT.

Figura 4 Condición de frontera Reflejar para la fase discreta

Los coeficientes de restitución normal y tangencial, definen la cantidad de momento que guarda la partícula en la dirección normal y tangencial a la pared después de la colisión con la frontera (ANSYS Inc., Ansys Fluent Theory Guide 14.5, 2016).

En casos de estudio de sedimentación de partículas este tipo de condición de frontera puede subestimar la eficiencia de remoción, ya que no permite la sedimentación de las partículas cuando se utiliza como parámetro para el fondo de la estructura de sedimentación (YAN, 2013)

Atrapar: bajo esta condición de frontera, los cálculos de trayectorias de la partícula son finalizados y ésta es considerada como "atrapada" (ANSYS Inc., Ansys Fluent Theory Guide 14.5, 2016). Esta condición, puede sobreestimar la eficiencia de remoción, ya que elimina toda posibilidad de una resuspensión de la partícula que alcanza este tipo de frontera (YAN, 2013).



Tomado de la Guía teórica de ANSYS FLUENT.

Figura 5 Condición de frontera Atrapar para la fase discreta

Capítulo 2

CFD aplicada al análisis de un sedimentador convencional

Con el fin de analizar la aplicación de la dinámica de fluidos computacional, en el diseño de sedimentadores, se realiza el dimensionamiento de una estructura de sedimentación típica en las plantas de tratamiento de las poblaciones colombianas, tomada de un ejemplo de la cátedra de diseño de aguas potabilizadoras de la Universidad Nacional de Colombia Abierta y a Distancia. La estructura de sedimentación analizada, hace parte de un grupo de cuatro sedimentadores diseñados para una población de 54.378 habitantes, la cual consume un caudal máximo diario de 150 lps, lo que se traduce en 37,5 lps para cada una de las estructuras de sedimentación.

El ensayo de columna de sedimentación¹ realizado sobre el agua captada, arrojó como resultado una carga superficial de 25 m³/m²*día producirá una remoción satisfactoria con una profundidad de 4,5 m. El diseño del sedimentador se presenta en el siguiente numeral.

2.1 Diseño hidráulico de sedimentador convencional

De acuerdo con lo expuesto anteriormente, se diseñará un sedimentador convencional de flujo horizontal para un caudal de 37,5 lps (3240 m³/d).

a) Área superficial del sedimentador

Basándose en la carga superficial de 20 m³/m²*día, la cual cumple con los parámetros establecidos por la normatividad vigente se obtiene.

$$A = \frac{Q}{CS} = \frac{3283}{25} = 130m^2$$

b) Ancho del sedimentador

¹ El procedimiento para la realización del ensayo de columna de sedimentación puede ser consultado en Purificación del Agua de Jairo Alberto Romero 2a edición.

El ancho del sedimentador se calcula asumiendo una relación entre el largo y ancho $L/B = 4$

$$b = \sqrt{\frac{A}{L}} = \sqrt{\frac{130}{4}} = 5,7 \Rightarrow 5,7m$$

c) Longitud del sedimentador

$$L = \frac{A}{b} = \frac{130}{5,7} = 22,73 \Rightarrow 22,75m$$

d) El tiempo de retención se calcula tomando como base la profundidad del tanque, definida en 4,0 m

$$t = \frac{AH}{Q} = \frac{130 * 4}{3240} = 0,16 \Rightarrow 3,84h$$

El valor obtenido de 3,84 horas, que se encuentra dentro de los parámetros recomendados por la literatura consultada ver Tabla 5.

e) La velocidad del flujo es:

$$v_h = \frac{Q}{H * B} = \frac{3240}{4 * 5,7} = 142,8 m/d \Rightarrow 1,65 cm/s$$

f) Para la entrada a la estructura, se diseña una pared de concreto perforada con agujeros circulares, de forma tal que se garantice una velocidad de entrada $v_{entrada}$ de 12 cm/s, con el fin de garantizar una velocidad que no altere el floc que entra desde el floculador.

$$A_{entrada} = \frac{Q}{v_{ent}} = \frac{3240}{86400 * 0,12} = 0,3125 m^2$$

Considerando orificios de sección circular de tres pulgadas de diámetro, se calcula la cantidad de necesaria de orificios para la entrada del agua a la estructura.

$$\#Orificios = \frac{4 * 0,3125}{\pi * (3 * 0,0254)^2} = 68,52 = 70 orificios$$

Los orificios más altos deberán estar ubicados entre $h/5$ y $h/6$ por debajo de la superficie del agua, los más bajos se ubicarán entre $h/4$ y $h/5$ siendo h la profundidad útil del sedimentador. La separación horizontal entre los centros de los orificios estará entre 0.5 y 0.9 cm y la vertical entre 0.4 y 0.6 cm, según lo especificado por Azevedo Netto. (Azevedo Netto, 1972)

g) La longitud del vertedero de salida se calcula para la carga típica de rebose para floc de alumbre de 2 l/s-m

$$L_{vert} = \frac{Q}{v_{ent}} = \frac{3240 * 1000}{86400 * 2,5} = 15,00 \text{ m}$$

Lo anterior se traduce en tres canaletas del mismo ancho del sedimentador, es decir de 5,70 m, dando como resultado una descarga definitiva de 2,20 l/s-m, que se encuentra dentro del rango recomendado por la normatividad vigente.

La separación entre las canaletas de recolección de agua sedimentada, estará entre 0.25h y 0.60h, medidos desde los bordes externos o de 1.20 m o 3.00 m medidos desde los ejes. (Azevedo Netto, 1972).

- h) La altura de la lámina de agua sobre los vertederos, se calcula con base en la ecuación de vertederos de pared delgada asumiendo un C de 1.80.

$$h = \left(\frac{Q}{C * L} \right)^{\frac{2}{3}} = \left(\frac{0.037}{1.8 * 3 * 5.7} \right)^{\frac{2}{3}} = 0,011m \Rightarrow 1,10 \text{ cm}$$

- i) La zona de lodos del sedimentador antes diseñado, se estipula con una profundidad de 0,50 m y una pendiente longitudinal de 2,0%

2.2 Análisis de sedimentador convencional con CFD

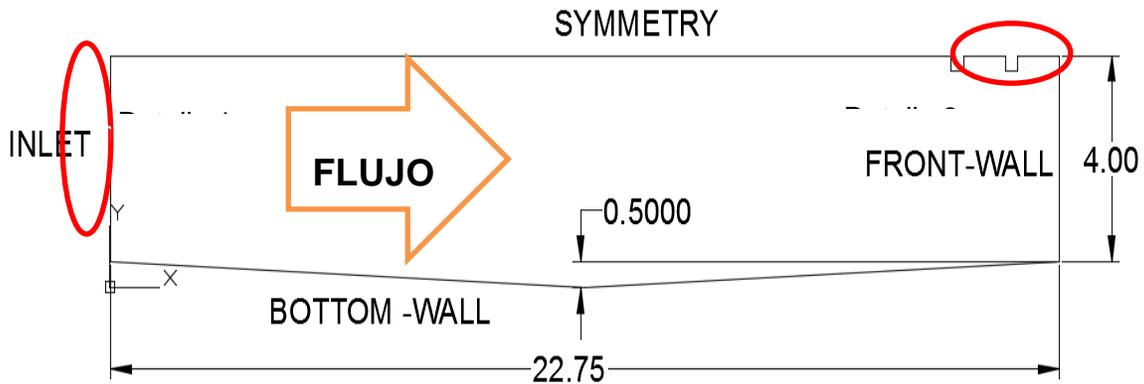
El estudio en CFD del sedimentador convencional, se realizó utilizando el software ICEM de ANSYS Inc. con la ayuda del cual se construyó la geometría de la estructura, a partir de los resultados obtenidos en el diseño del sedimentador con el uso de los conceptos y formulaciones tradicionales, en la misma herramienta se produjo el mallado de la geometría para lo cual se procuró la utilización de mallas estructuradas con celdas de tetraedros. El análisis de dinámica de fluidos propiamente dicho, se elaboró en FLUENT (incluido en el paquete de software ANSYS), a partir del cual se resuelven las ecuaciones de conservación de la masa, momento, continuidad y turbulencia, para este caso específico se dividió en dos partes, en la primera se simuló el funcionamiento hidráulico de la estructura y posteriormente en la segunda fase se incluyeron las partículas.

2.2.1 Geometría y mallado.

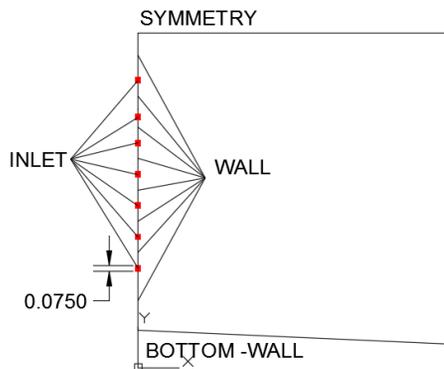
Las dimensiones obtenidas del diseño tradicional, se tomaron como punto de partida para la definición de la geometría que sería utilizada para la simulación hidráulica de la estructura. La

estructura se simplificó en una geometría en dos dimensiones, con el fin de ahorrar costo computacional innecesario para el análisis que se pretende realizar.

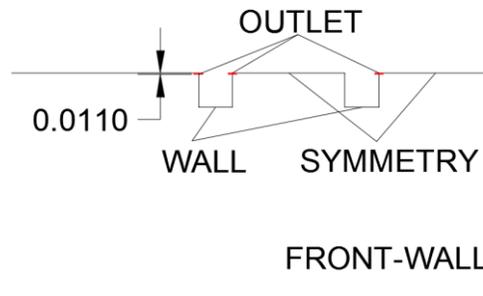
La entrada del agua a la estructura se dispone en el límite izquierdo, a través de orificios de 0,075 m de altura (3 pulgadas) y la salida se ubica en la parte superior del límite opuesto, a través de canaletas de recolección. Con lo anterior se busca simular la pared de orificios diseñada para la entrada y las canaletas de salida propuestas.



Detalle 1 Inlet



Detalle 2 Outlet



Fuente: Elaboración propia

Figura 6 Dimensiones y condiciones de frontera de la geometría utilizada

Una vez definida la geometría para la simulación, se procedió al mallado de la misma lo cual, como se mencionó con anterioridad, se realizó con base en mallas estructuradas y con el uso de las herramientas provistas para este fin en el paquete de software de ANSYS. La malla

utilizada fue de 898.316 nodos y 895.584 celdas tipo tetraedros. Debido a los tiempos requeridos para alcanzar la convergencia, el cual alcanzó los 30 días para la simulación en 2D² y a la densidad de la malla para poder alcanzar la convergencia, no se realizó un análisis de independencia del mallado. La malla finalmente utilizada fue de 905.400 celdas y 909.722 nodos, debido a adaptaciones que fue necesario realizar para lograr la convergencia de las variables. Cabe aclarar que dichas adaptaciones fueron efectuadas al interior de FLUENT utilizando las herramientas pertinentes.

2.2.2 Configuración del modelo.

Con base en la geometría descrita en los numerales anteriores, se configuraron en ANSYS FLUENT, los parámetros necesarios para efectuar la simulación del comportamiento del tanque de sedimentación convencional, lo cual se efectuó en dos dimensiones.

Para esto, se determinó el tipo de simulación a efectuar, se estipularon los tipos de modelo a resolver, se definieron las condiciones de frontera y se establecieron los parámetros de entrada al dominio computacional seleccionado, de acuerdo con lo estipulado en el numeral 1.2.2 y que se resumen en la siguiente tabla.

Tabla 9 Métodos utilizados en el presente trabajo

Variable	Método
Acople Presión-Velocidad	SIMPLE
Gradientes	Mínimos cuadrados basado en celdas
Presión	Segundo Orden
Momento	Primer Orden Upwind
Energía Cinética Turbulenta	Primer Orden Upwind
Rata de Disipación Específica	Primer Orden Upwind

Es importante recalcar que, el método utilizado para la discretización del momento es de Primer Orden Upwind, es aceptable considerando que la malla se encuentra alineada con el flujo, de acuerdo con lo descrito en la guía teórica de ANSYS FLUENT. La tolerancia para cada una de las variables se ajustó en 1×10^{-6} .

Inicialmente, la simulación se realizó para el comportamiento hidráulico de la estructura, esta modelación se efectuó en para un estado fijo de tiempo, con el fin de observar las

² La simulación fue efectuada en un equipo Intel core I5 de 2.4 GHz con 8Gb de memoria RAM con sistema operativo Windows 10

características más relevantes del comportamiento hidráulico, tales como velocidades de flujo, líneas de corriente, zonas de recirculación y zonas muertas en el dominio computacional. Una vez obtenidos resultados de la simulación mencionada, se inyectaron las partículas y analizó la decantación de las mismas.

Las condiciones de frontera definidas para la simulación del sedimentador se presentan en la Tabla 10.

Tabla 10 Condiciones de frontera utilizadas

Frontera	Condición
Entrada	Velocity Inlet
Salida	Pressure outlet
Superficie	Symetry
Paredes	Wall

La velocidad de entrada se estipuló en 0.12 m/s, teniendo en cuenta que esta no debe ser superior a los 0.15 cm/s para no ocasionar perturbaciones en la lámina líquida del sedimentador, lo cual llega ser más importante que la posibilidad de rotura del floc que puede soportar un mayor esfuerzo (Arboleda Valencia, 2000).

Para la superficie del sedimentador, se asume la condición de frontera de simetría considerando que la baja viscosidad del aire en contacto con la superficie se puede aproximar a un caso de flujo sin cortantes (zero-shear flow), en el cual es apropiado el uso de este tipo de condiciones.

La salida se definió como pressure outlet, considerando la presión atmosférica, ya que la salida de las canaletas de recolección es una entrega libre. Por último, todo límite sólido se definió como tipo *pared* sin considerar la rugosidad de las mismas.

Adicionalmente, dentro de las condiciones de frontera definidas para la simulación del sedimentador, se contemplaron las condiciones de operación definiendo la fuerza de la gravedad con un valor de 9.81 m/s^2 , en dirección negativa en el eje *y*, y la presión atmosférica la cual se estableció en un punto de la superficie con un valor de 101325 Pa.

2.2.3 Características del modelo de fase discreta

Para la solución de las trayectorias de las partículas de floc inyectadas al modelo, se asumió lo siguiente:

- Las partículas son completamente esféricas.
- Las partículas no afectan el comportamiento del flujo.
- No se consideran el efecto de colisiones entre partículas.
- No se considera el efecto de la rugosidad en las paredes.
- No se considera la rotación de las partículas.
- Se utiliza el modelo estocástico de seguimiento de partículas, con el fin de tener en cuenta el efecto de la viscosidad en las trayectorias, siendo la constante de escala de tiempo constante con un valor de 0.15, valor por defecto el cual no se modifica ya que no se utiliza el modelo RSM (ANSYS Inc., Ansys Fluent Theory Guide 14.5, 2016). Adicionalmente, se asume una vida aleatoria de los vórtices.

Para el modelo estocástico de las trayectorias, se realizó un análisis para determinar el número óptimo de partículas a ser analizadas, de acuerdo con el tiempo de cómputo y el número de iteraciones necesarias para alcanzar la convergencia, la cual se consideró alcanzada cuando no se producían cambios al aumentar el número de iteraciones, la Figura 7 muestra los resultados obtenidos a partir de los cuales se concluyó, que 25000 partículas son adecuadas ya que al incrementarlas el número de iteraciones permanece casi constante.

Para la introducción de las partículas al dominio computacional, se creó una única inyección la cual fue “soltada”, desde cada una de las entradas definidas (en total 7), el flujo másico inyectado por cada entrada fue de 2.25×10^{-3} Kg/s para un total de 1.58×10^{-2} Kg/s. Dicho caudal másico de partículas, fue obtenido con base en los resultados de Goula et al en 2007.

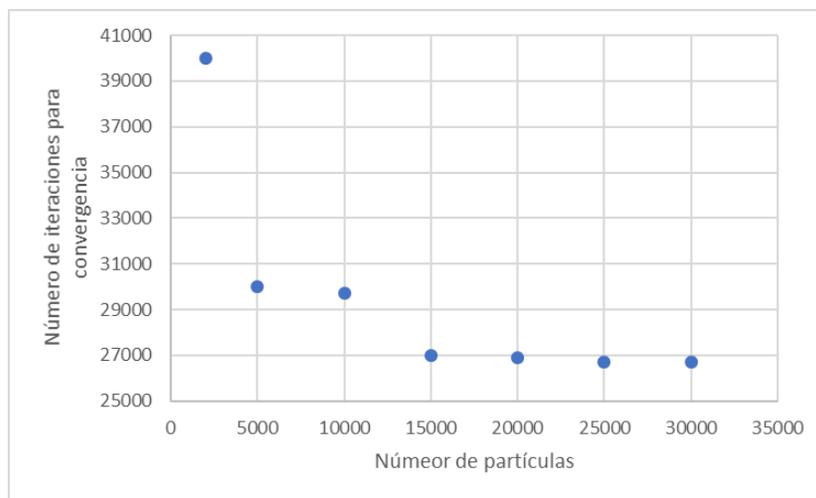


Figura 7 Número de partículas vs número de iteraciones

Las características de las partículas introducidas al modelo de acuerdo con la inyección creada se presentan en la Tabla 11 y en la Figura 8, en las cuales se muestra la relación entre los diámetros y el porcentaje con respecto a la masa total inyectada.

Tabla 11 Características inyección de partículas

Diámetro (m)	Caudal másico (Kg/s)	Caudal másico (%)
2.00E-05	1.19E-04	5.27%
8.92E-05	2.76E-04	12.25%
1.58E-04	3.23E-04	14.37%
2.28E-04	3.21E-04	14.27%
2.97E-04	2.91E-04	12.94%
3.66E-04	2.47E-04	10.98%
4.35E-04	1.99E-04	8.86%
5.04E-04	1.54E-04	6.84%
5.73E-04	1.15E-04	5.10%
6.43E-04	8.24E-05	3.66%
7.12E-04	5.76E-05	2.56%
7.81E-04	3.91E-05	1.74%
8.50E-04	2.59E-05	1.15%
Total general	2.25E-03	100.00%

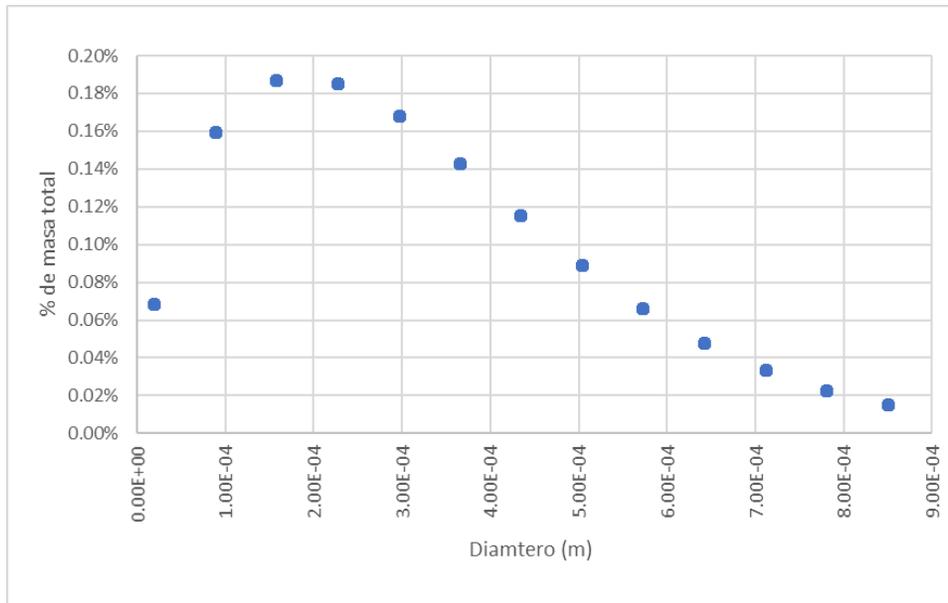


Figura 8 Características inyección de partículas

En cuanto a las condiciones de frontera para la fase discreta, se consideró que las partículas eran “soltadas” desde las entradas definidas, para el fondo del sedimentador se estableció la condición tipo atrapar (trap), es decir cada partícula que alcanza el fondo se asume como sedimentada. Para el resto de las paredes, se definió la condición como reflejar (reflect) y para la salida se asumió como escapar (escape), lo que se traduce en que cualquier partícula que alcanza la salida finaliza su trayectoria y se considera como no sedimentada.

Capítulo 3 Resultados

En este capítulo, se presentan los resultados obtenidos en la simulación realizada para el sedimentador convencional descrito en los numerales anteriores. El presente aparte del documento se divide en dos partes, la primera concierne al análisis del comportamiento hidráulico de la estructura, el cual fue resuelto previamente a la introducción de las partículas. En una segunda parte se analizan las trayectorias de las partículas y su tránsito a lo largo de la estructura de sedimentación.

3.1 Comportamiento hidráulico de la estructura

Como se mencionó con anterioridad, la fase inicial del estudio fue el análisis del comportamiento hidráulico de la estructura, el cual se describe a continuación.

3.1.1 Perfiles de velocidad.

Con el fin de observar las velocidades presentes al interior de la estructura, parámetro de vital importancia para garantizar el adecuado funcionamiento del sedimentador. Por una parte, la velocidad horizontal ayuda a la floculación de los sólidos suspendidos promoviendo el choque entre ellos, aumentando la proporción de partículas finas que son removidas, pero por otra la velocidad horizontal arrastra y resuspende los sólidos o flóculos ya sedimentados. Considerando lo anterior, es importante que la velocidad horizontal sea tal que estimule la floculación, sin llegar a afectar la eficiencia del sedimentador (Arboleda Valencia, 2000).

De acuerdo con Romero (2006), la velocidad horizontal no será uniforme a lo largo del sedimentador, ya que existen fenómenos como las corrientes de densidad y cortocircuitos, este último incrementado, cuando se tienen velocidades de entrada altas. El mismo autor, recomienda velocidades horizontales entre 0.25 y 1.50 cm/s y en todo caso siempre menores de 2.00 cm/s.

La velocidad horizontal en el dimensionamiento de los sedimentadores, depende de las relaciones entre el largo, el ancho y la profundidad de la estructura (Arboleda Valencia, 2000),

que como se vio anteriormente, de acuerdo con las recomendaciones de diseño debe respetar ciertos rangos.

Otro aspecto a considerar, es que la afectación de las velocidades de entrada puede llegar hasta los 100 diámetros adentro de la estructura, razón por la cual es conveniente que las velocidades de entrada se mantengan en lo posible por debajo de los 15 cm/s (Arboleda Valencia, 2000).

La selección del tipo de estructura seleccionada para la recolección del agua sedimentada, afecta en buena parte la mayor o menor proporción de partículas que pueden llegar a ser resuspendidas, esta zona, a diferencia de la zona de entrada afecta sólo a la parte final de la estructura. Sin embargo, se debe considerar que el floc que alcanza el final de la estructura es pequeño, con una velocidad de sedimentación baja y si la componente ascensional de la velocidad de la partícula es mayor que la velocidad de sedimentación, la partícula tenderá a ser arrastrada por el flujo, por lo que alteraciones pequeñas pueden crear una componente vertical que levante los flóculos.

Con base en lo anterior, se analizaron los perfiles de velocidad producidos al interior del sedimentador a 0.75 m, 2 m y otros adicionales con el fin de establecer la afectación que producen los orificios de entrada, a que distancia se normaliza el flujo y las afectaciones producidas por la zona de salida. Las secciones analizadas se presentan en la siguiente figura (0.01 m, 0.75 m, 2 m, 4 m, 6 m, 8 m, 10 m, 11.75 m, 12 m, 14 m, 16 m, 18 m, 20 m, 21 m, 22 m).

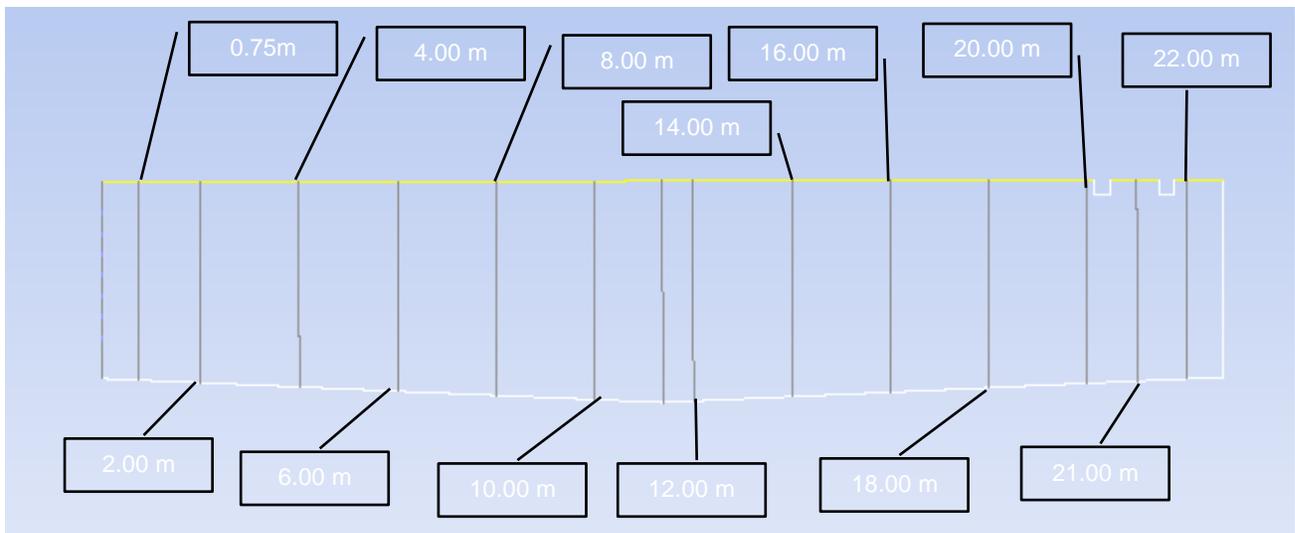


Figura 9 Secciones (líneas) analizadas a lo largo del dominio computacional

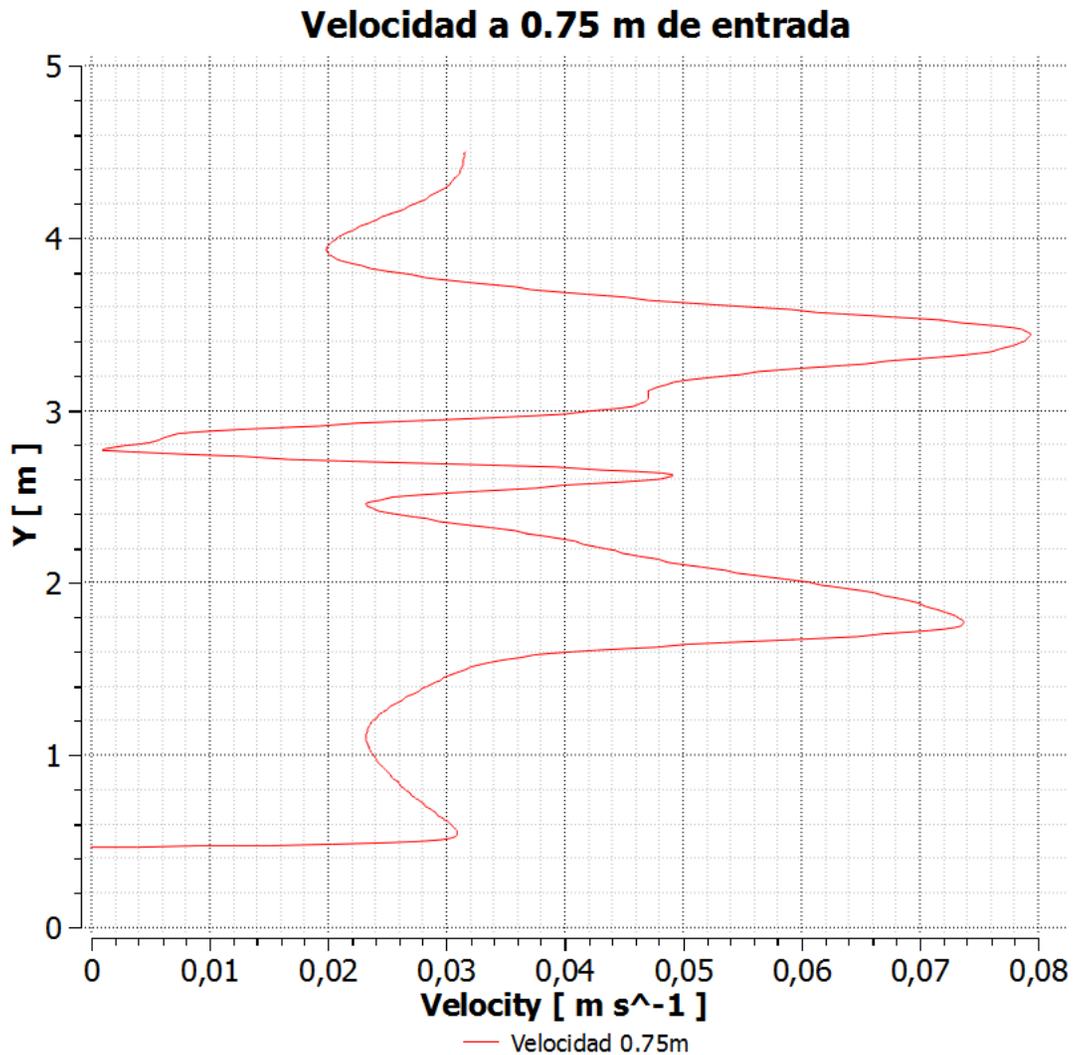


Figura 10 Velocidad a 0.75 m de distancia de la zona de entrada

Arboleda (2000), afirma que la velocidad de entrada disminuye un 40% aproximadamente a una distancia igual a diez veces el diámetro de los orificios de entrada. Considerando que la velocidad de entrada establecida fue de 12.00 cm/s, en la Figura 10 se puede apreciar que a 0.75 m de distancia (10 diámetros de los orificios) de la entrada a la estructura, la velocidad ha disminuido hasta un valor cercano a los 8.00 cm/s equivalente al 60% de la velocidad de entrada inicial, corroborando lo establecido por Arboleda (2000).

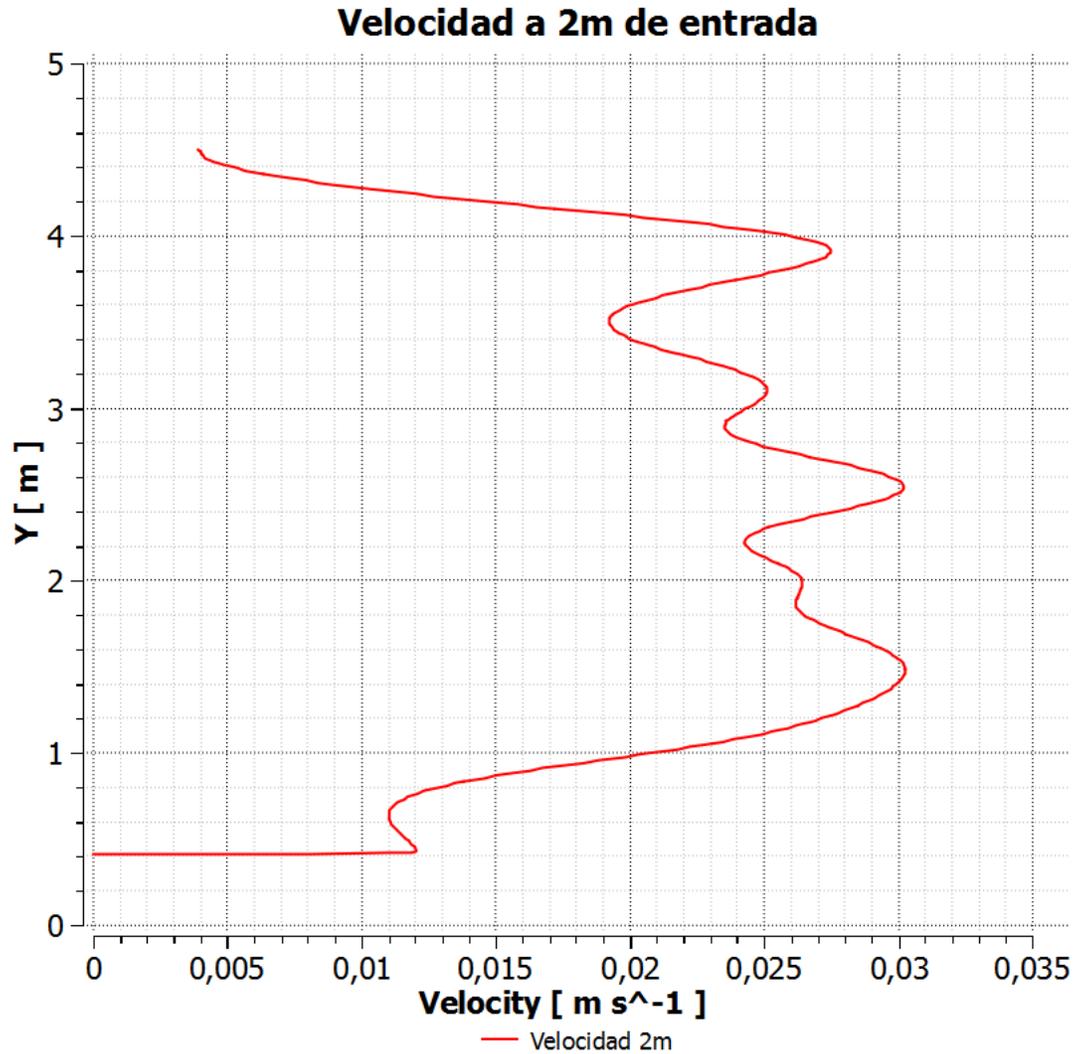


Figura 11 Velocidad a 2 m de distancia de la zona de entrada

A dos metros de distancia, la velocidad alcanza valores de 3.00 cm/s equivalentes un 25% de la velocidad de entrada inicial (ver Figura 11). A una distancia igual a 100 diámetros de los orificios de entrada, se obtiene una velocidad de 1,44 cm/s, equivalente a 12% de la velocidad inicial, con lo que se obtiene un 88% de reducción en la velocidad, relativamente menor a lo que establece Arboleda (2000), quién menciona que a esta distancia la reducción en la velocidad es cercana al 94% (ver Figura 12).

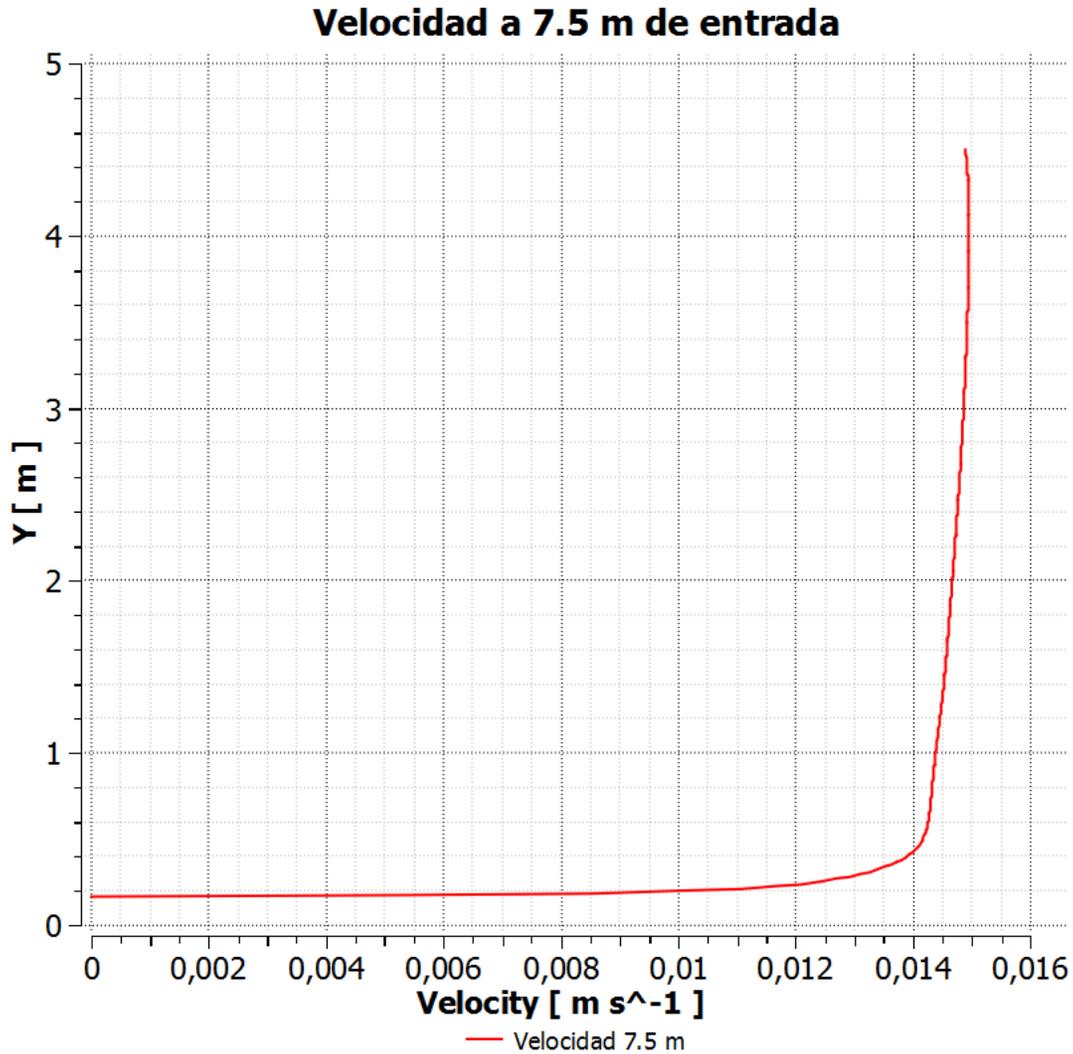


Figura 12 Velocidad a 7.5 m de distancia de la zona de entrada

Aproximadamente a los diez metros de distancia, medidos desde la zona de entrada, se puede apreciar que el perfil de velocidad se encuentra completamente desarrollado con una velocidad media cercana a 1.42 cm/s , la cual es relativamente menor a la calculada en la metodología de dimensionamiento analítico, que actualmente se utiliza para este tipo de estructuras.

La afectación de la zona de salida inicia aproximadamente a los 15 m de distancia medidos desde la zona de entrada, aumentando las velocidades, sin embargo, a los 18 m la afectación se incrementa llegando a velocidades casi hasta los 1.80 cm/s . A los 20 metros en proximidades de la primera canaleta de recolección las velocidades se incrementan por encima de los 9.00 cm/s (ver Figura 13).

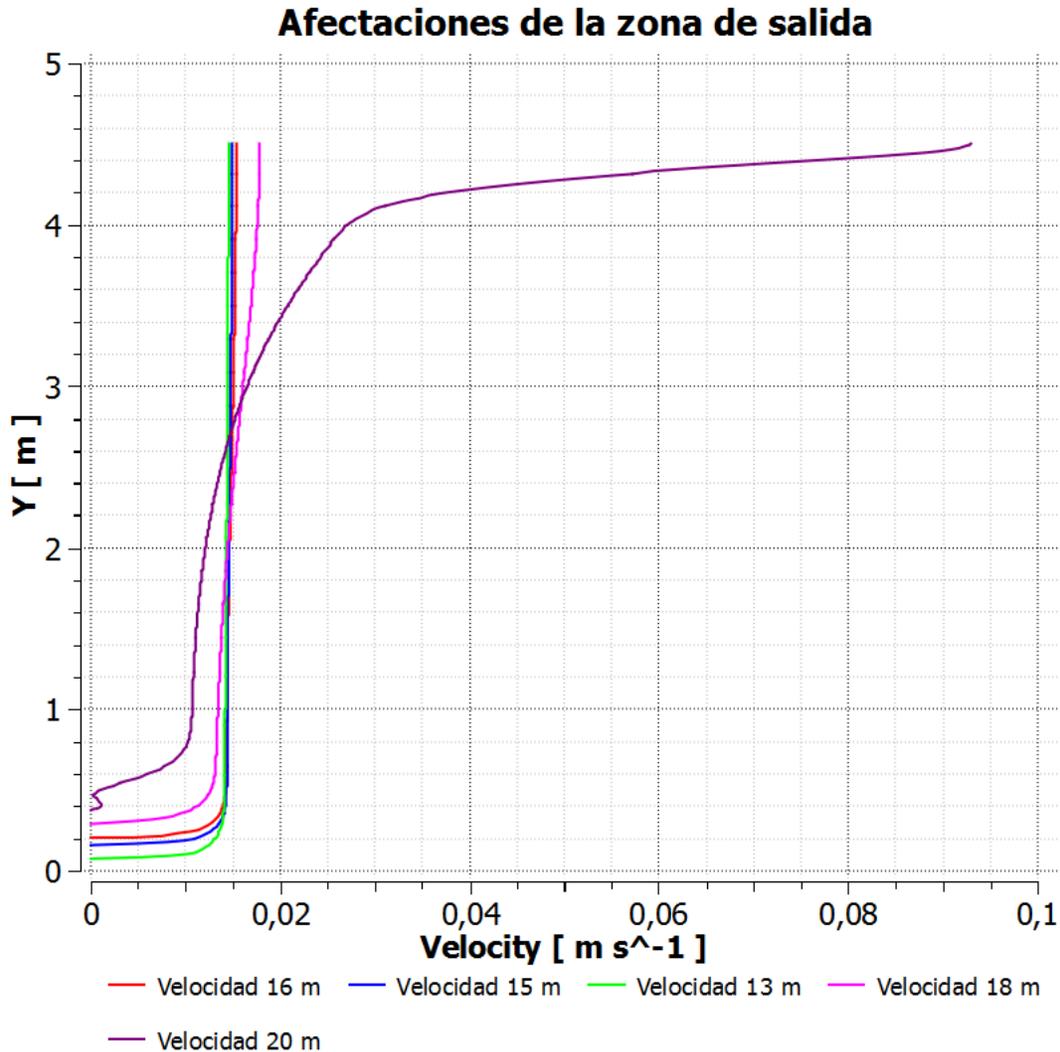


Figura 13 Afectaciones de la zona de salida

Observando los contornos de velocidad presentados en la Figura 14, se puede apreciar la afectación producida al interior de la estructura por las zonas de entrada y salida. Se puede apreciar que en las zonas de entrada y salida se producen velocidades superiores a la presentada en la zona media del sedimentador. En la zona de entrada, se puede ver que las velocidades de los chorros producidos por los orificios, alcanzan a afectar el flujo por encima de los cuatro metros medidos desde la pared de entrada. De manera similar, las canaletas de salida producen un fenómeno de aceleración del flujo en la parte superficial desde aproximadamente 16 m, y un incremento de la velocidad en el fondo de la estructura con dirección ascendente aproximadamente desde los 18 m (ambas distancias medidas desde la pared de entrada).

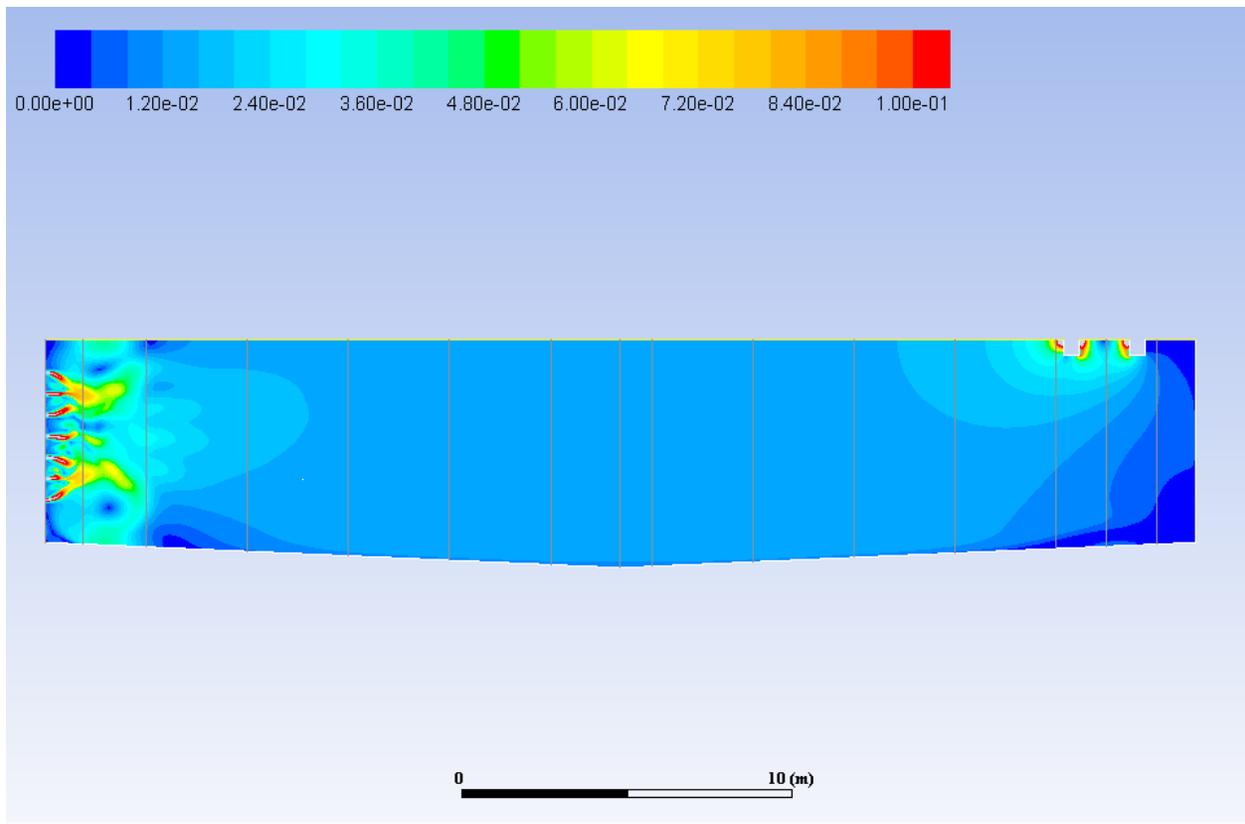


Figura 14 Contornos de velocidad en el dominio computacional

3.1.2 Líneas de corriente

Las líneas de corriente al interior de sedimentador muestran cuatro zonas con vórtices claramente definidas, dos al inicio del sedimentador y dos al final, que básicamente coinciden con las zonas de contacto con las paredes verticales de la estructura. Estas zonas pueden afectar la sedimentación de las partículas, ya que pueden inducir velocidades ascensionales en las partículas. La Figura 15 muestra las líneas de corriente del interior del sedimentador analizado.

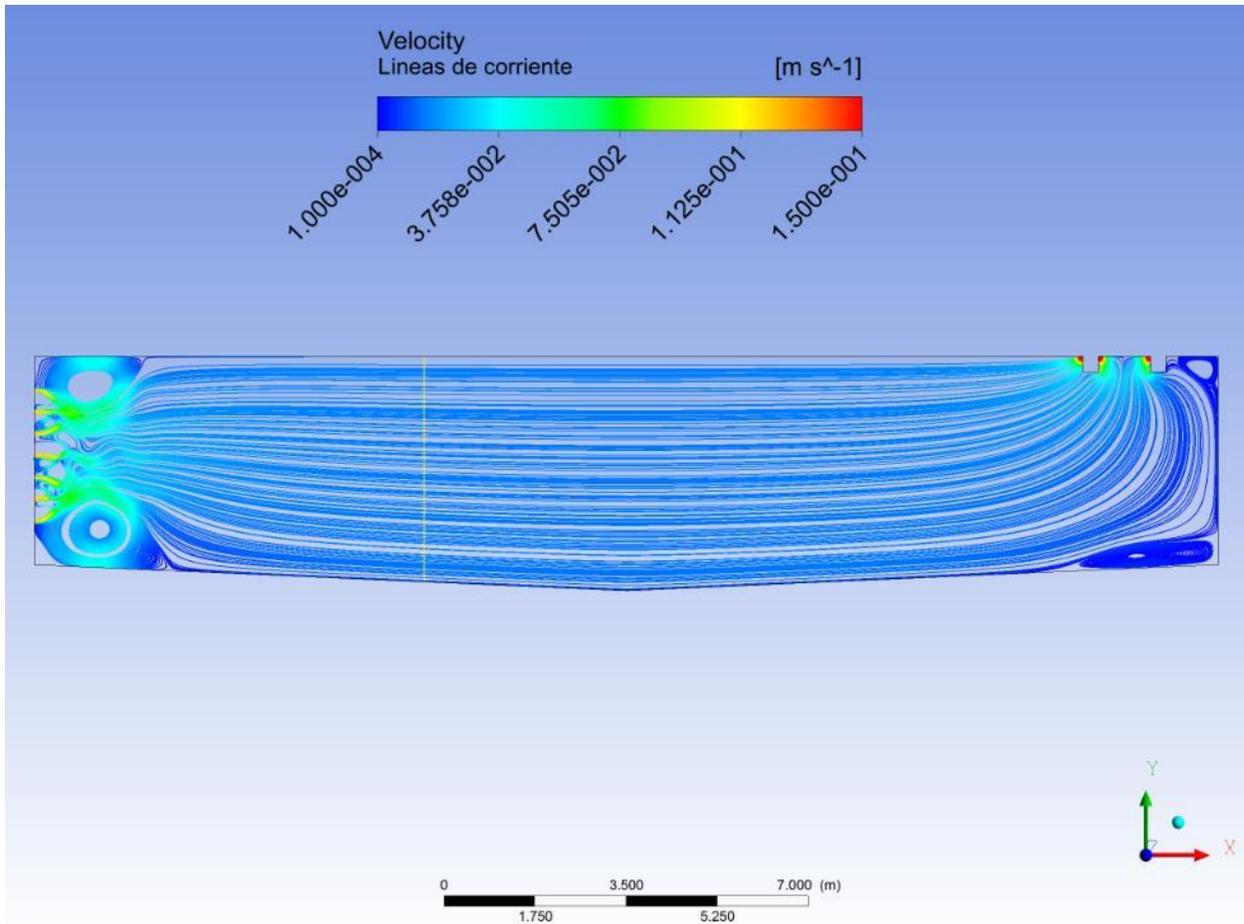


Figura 15 Líneas de corriente

Se puede apreciar que el sedimentador tiene un flujo uniforme, tal como se mostró con anterioridad, alcanza un perfil de velocidad completamente desarrollado aproximadamente a los 10 metros después de la pared de orificios. Las líneas de corriente que se pueden apreciar cuentan con una distribución uniforme, con velocidades por debajo de los 2.00 cm/s que cumple con lo recomendado por la literatura existente. Como se puede apreciar en la siguiente figura, se generan dos zonas de recirculación a la entrada a la estructura debidas, al movimiento de la masa de agua generado por el agua entrante.

Igualmente, en la zona de salida se generan dos zonas muertas con velocidades cercanas a cero, que pueden generar tiempos de retención superiores a lo estipulado en el diseño.

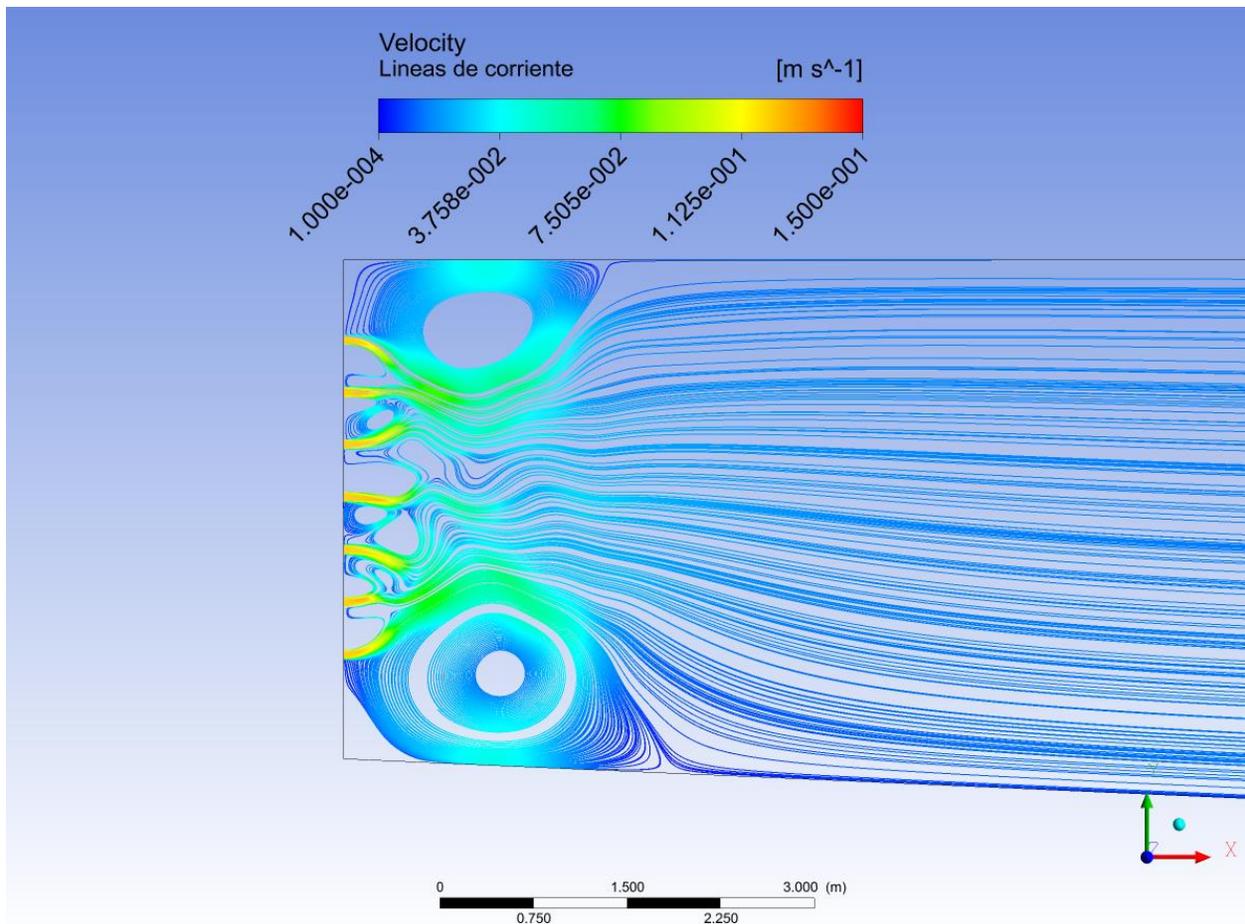


Figura 16 Líneas de corriente (detalle de entrada)

3.1.3 Energía cinética turbulenta

Otro aspecto que se analizó dentro del presente estudio, fue el comportamiento de la energía cinética turbulenta a lo largo del dominio computacional, para lo cual se obtuvo el valor máximo de este parámetro en cada una de las secciones estipuladas en la Figura 9. Dichos valores se graficaron (ver Figura 17), con el fin de observar las variaciones.

Se puede observar la disminución del parámetro analizado, el cual se estabiliza alrededor de los 10 metros que concuerda con lo mostrado en los perfiles de velocidad, en los cuales se observa que el perfil de velocidad del flujo al interior de la estructura se encuentra completamente desarrollado a esa distancia.

No obstante, se presenta un incremento en la TKE en inmediaciones de la salida, efecto de las alteraciones que produce la estructura de salida del sedimentador, la cual acelera el flujo como se mostró con anterioridad.



Figura 17 Energía cinética turbulenta (TKE) en cada sección analizada

3.1.4 Análisis de y^+ en el fondo

Un aspecto importante para analizar es el y^+ , dado que el modelo SST $k-\omega$ utiliza el “tratamiento de pared mejorado”, lo que se traduce en que las condiciones de frontera dependerán de la calidad de la malla. Como se mencionó con anterioridad, este tratamiento utiliza una función de empalme entre las leyes lineal y logarítmica, creando una única “ley de la pared” para toda la región en proximidades de la pared, esto se logra usando la función sugerida por Kader mostrada en la **Ecuación 20** (ANSYS Inc., Ansys Fluent Theory Guide 14.5, 2016).

Esta aproximación permite que la ley de la pared completa sea modificada, para tener en cuenta efectos como gradientes de presión o propiedades variables. También asegura el comportamiento asintótico para valores grandes y pequeños de y^+ , y una representación razonable de los perfiles de velocidad para los valores de y^+ comprendidos entre $3 < y^+ < 10$ (ANSYS Inc., Ansys Fluent Theory Guide 14.5, 2016).

Con base en lo anterior se realiza el análisis del y^+ , que se presenta a lo largo del fondo de la estructura, con el fin de evaluar la validez del modelo utilizado, la Figura 18 muestra el comportamiento de y^+ en el fondo del sedimentador.

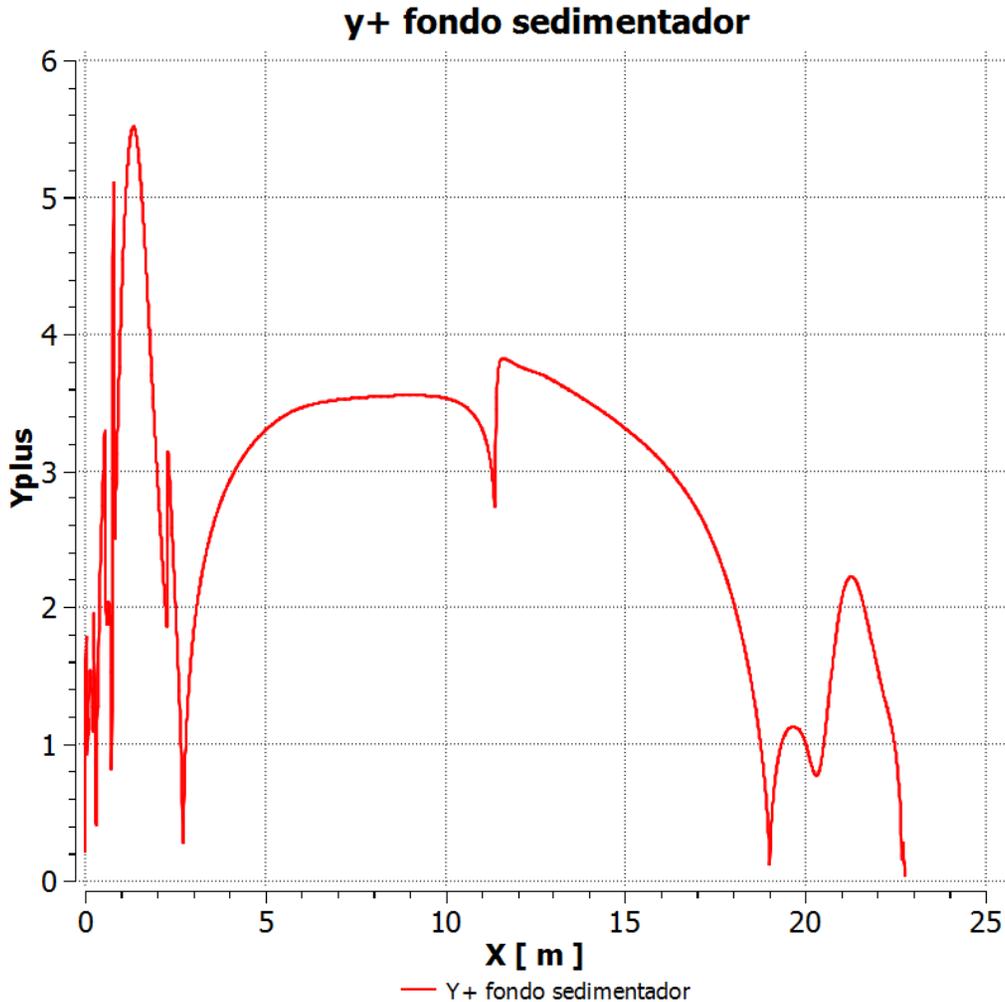


Figura 18 Comportamiento de y^+ en el fondo del sedimentador

De acuerdo con lo observado, el y^+ obtenido no supera los valores del rango estipulado para el uso de la aproximación propuesta por Kader en la mayor parte de la longitud de la estructura, por lo que se puede concluir que los perfiles de velocidad obtenidos son razonables.

3.2 Análisis de la sedimentación de partículas

Una vez definido el comportamiento hidráulico del sedimentador, se procedió a realizar el análisis de la sedimentación y trayectorias de las partículas. Como se describió anteriormente, la simulación de las partículas, se realizó bajo la aproximación lagrangiana utilizando el modelo de fase discreta (DPM) de ANSYS FLUENT.

El proceso de sedimentación de las partículas de floc entrantes al sedimentador estudiado, se realizó observando en determinadas secciones la masa y el flujo másico de las partículas, tomando como base el diámetro de las mismas para así determinar el proceso de sedimentación. Las secciones se trazaron en las abscisas 0.01 m, 0.75 m, 1.00 m, 2.00 m, 4.00 m, 6.00 m, 8.00 m, 10.00 m, 12.00 m, 14.00 m, 16.00 m, 18.00 m, 20.00 m, 21.00 m y 22.00 m.

Las figuras siguientes (Figura 32, Figura 33, Figura 34, Figura 35), muestran la masa de las partículas en kilogramos y el flujo másico en Kilogramos por segundo en cada una de las secciones analizadas. A través de éstas, se aprecia la disminución de los diámetros, especialmente de aquellos de mayor tamaño, que cruzan las secciones analizadas la cual es causada por el proceso de sedimentación.

Para partículas de diámetros superiores a 7.84×10^{-4} m, el proceso completo de sedimentación ocurre entre los 6 y 8 metros de distancia de la pared de orificios de entrada a la estructura, lo que se puede observar en la Figura 33, donde se aprecia que en la sección ubicada a 8 metros de la pared de la zona de entrada, no se presenta diámetros superiores a los 7.12×10^{-4} m, la Figura 19 muestra las trayectorias de estas partículas.

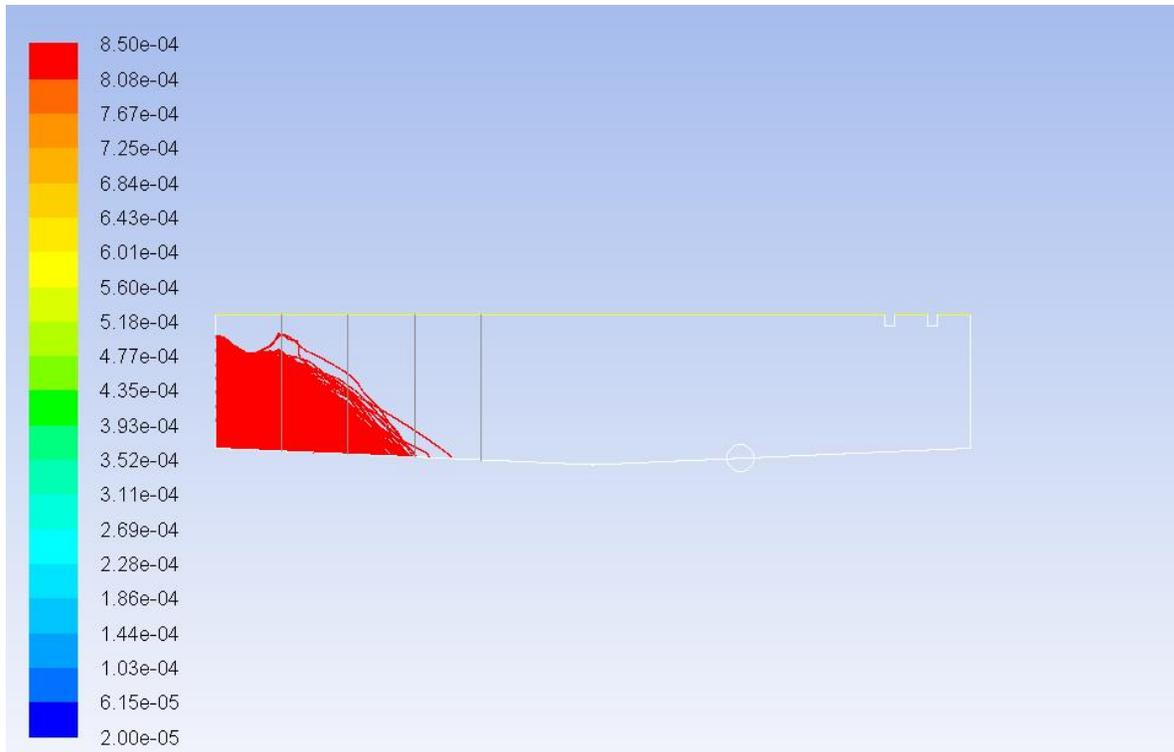


Figura 19 Trayectorias de partículas con diámetros mayores a 7.12×10^{-4}

Partículas con diámetros entre 7.12×10^{-4} m y 6.43×10^{-4} m. presentan las trayectorias mostradas en la Figura 20 y su proceso de sedimentación completo se alcanza antes de los 10 m de recorrido de la estructura, se puede observar en la Figura 33, que el flujo y la masa de estas partículas es cero en la sección tomada a los 10 metros de distancia de la entrada. Observando que estas partículas comienzan a ser afectadas por la zona de recirculación que se presenta en la zona superior de la estructura a la entrada de la misma, aspecto que no se apreció con las partículas con diámetros mayores.

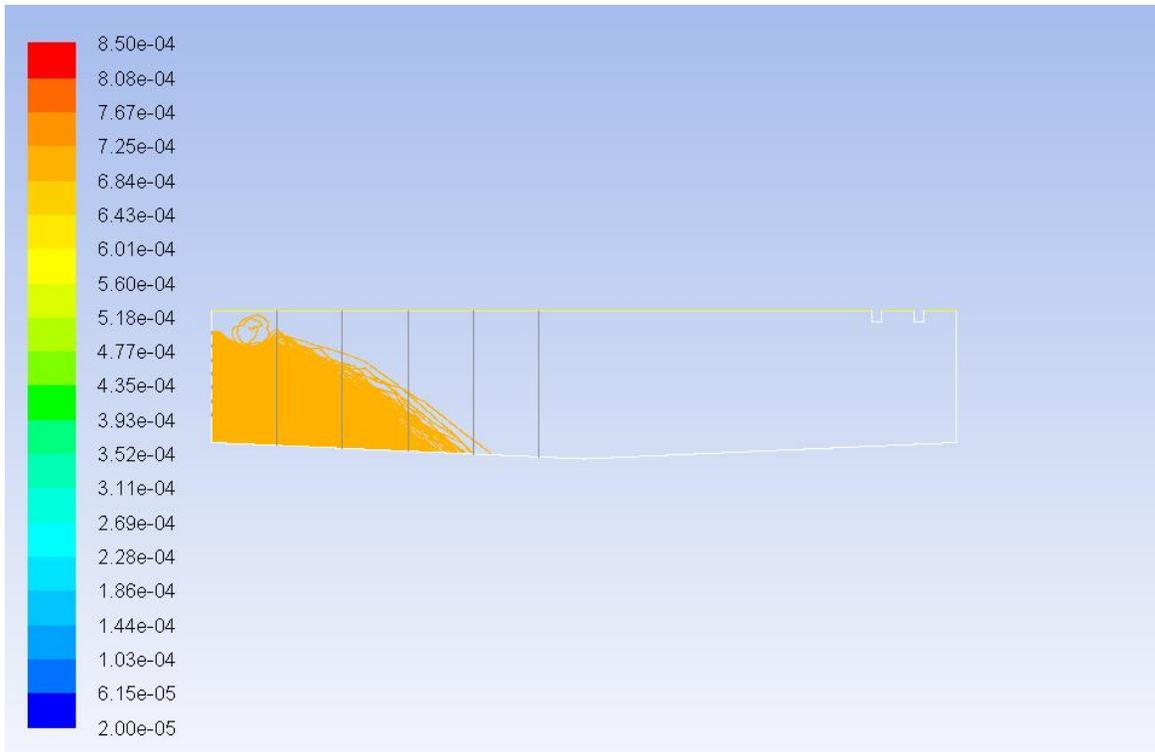


Figura 20 Trayectorias de partículas con diámetros entre 7.12×10^{-4} y 6.43×10^{-4}

Como es de esperarse a medida que los diámetros disminuyen el proceso de sedimentación de las partículas se alarga, lo que se traduce en trayectorias más largas, también la afectación de las zonas de recirculación sobre las partículas se incrementa. Estos comportamientos se pueden apreciar en las figuras siguientes, en las cuales se observa que para diámetros entre 6.43×10^{-4} y 5.73×10^{-4} metros, puede incluso prolongarse hasta los 12 m (ver Figura 21), partículas más pequeñas hasta los 5.04×10^{-4} m logran alcanzar el fondo de la estructura a los 14 m después de entrar al sedimentador (ver Figura 22).

La Figura 23 muestra las trayectorias de los flocs con diámetros entre 5.04×10^{-4} y 4.35×10^{-4} , que llegan hasta los 20 m para alcanzar su proceso de sedimentación. Partículas con tamaños por debajo de estos valores comienzan a verse afectadas por la estructura de salida, ya que empiezan a presentarse flocs alcanzando las canaletas de recolección de agua sedimentada (ver Figura 24).

A medida que los tamaños decrecen aún más, menos partículas alcanzan el fondo de la estructura y más alcanzan la zona de salida logrando salir de la estructura ver figuras Figura 25 a Figura 29.

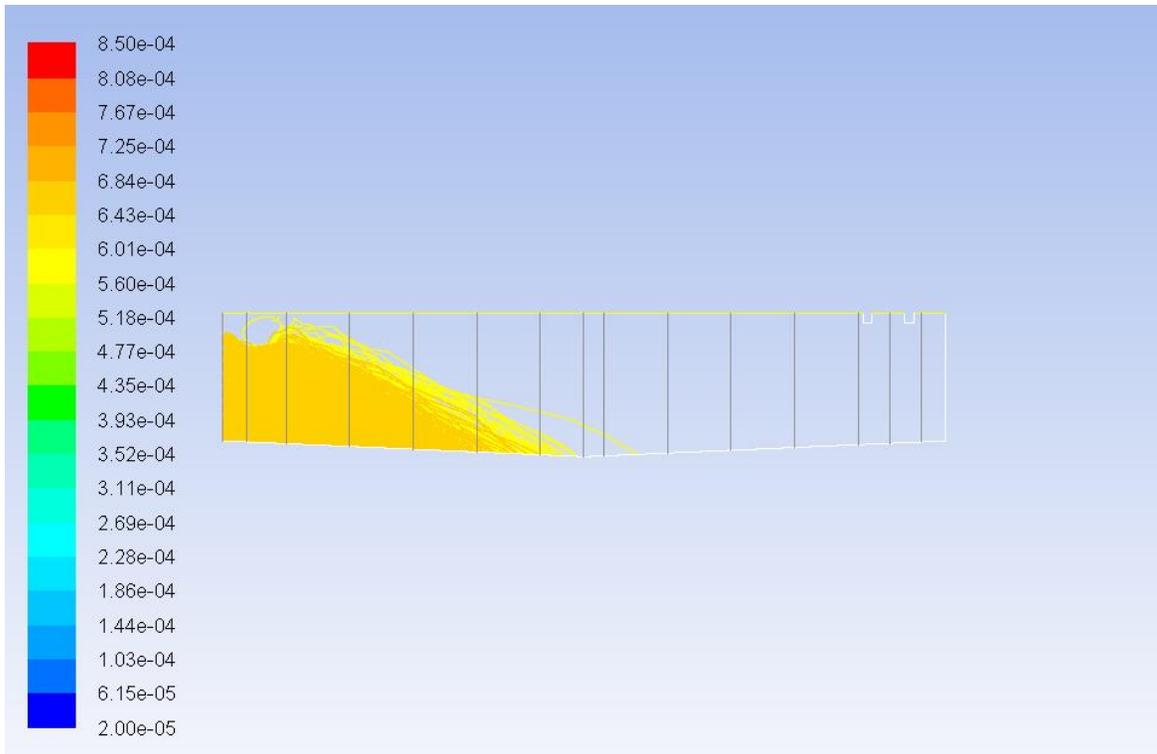


Figura 21 Trayectorias de partículas con diámetros entre 6.43×10^{-4} y 5.73×10^{-4}

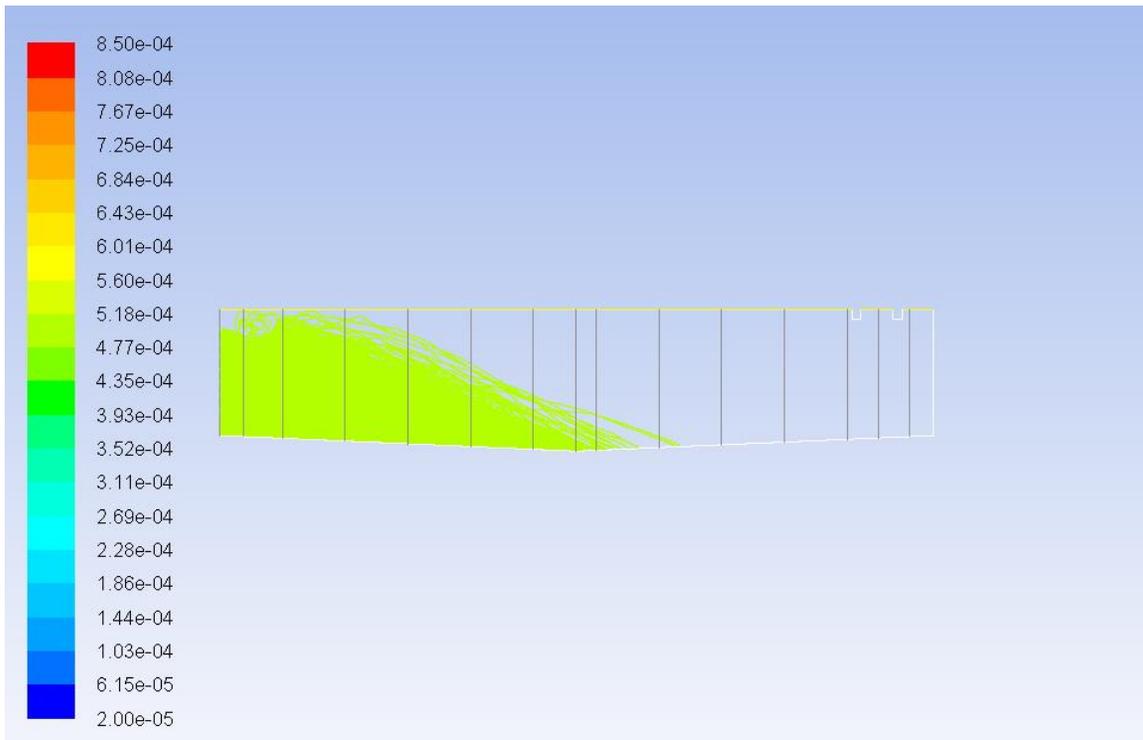


Figura 22 Trayectorias de partículas con diámetros entre 5.73×10^{-4} y 5.04×10^{-4}

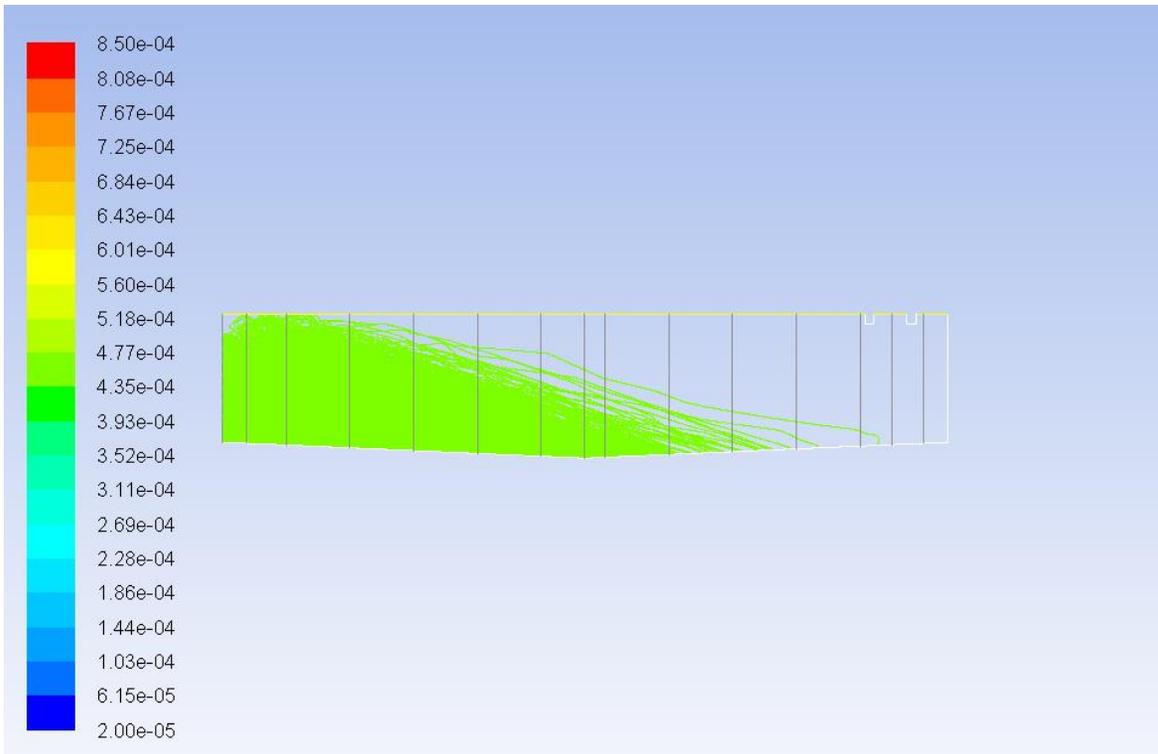


Figura 23 Trayectorias de partículas con diámetros entre 5.04×10^{-4} y 4.35×10^{-4}

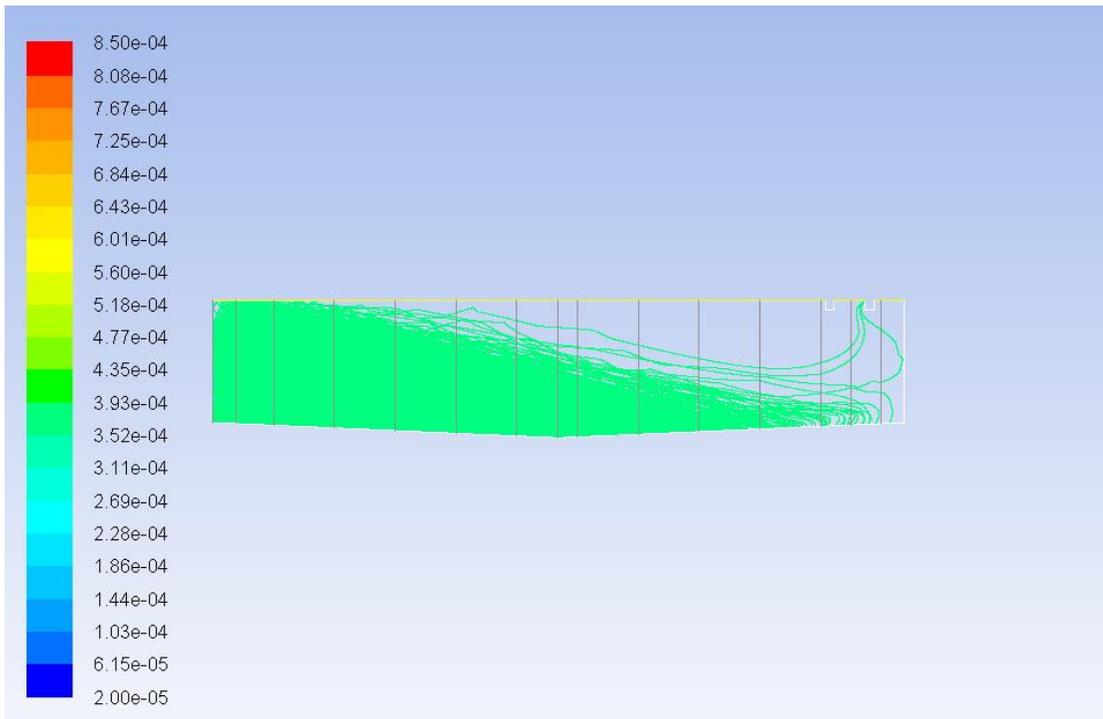


Figura 24 Trayectorias de partículas con diámetros entre 4.35×10^{-4} y 2.97×10^{-4}

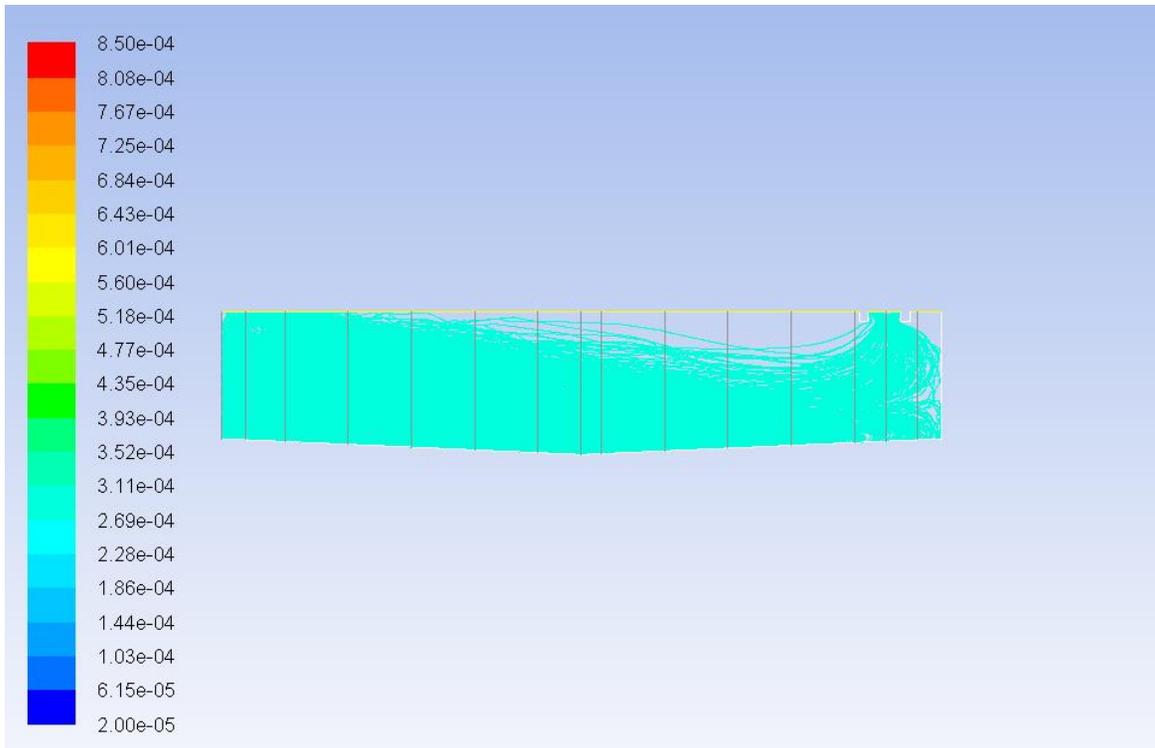


Figura 25 Trayectorias de partículas con diámetros entre 2.97×10^{-4} y 2.28×10^{-4}

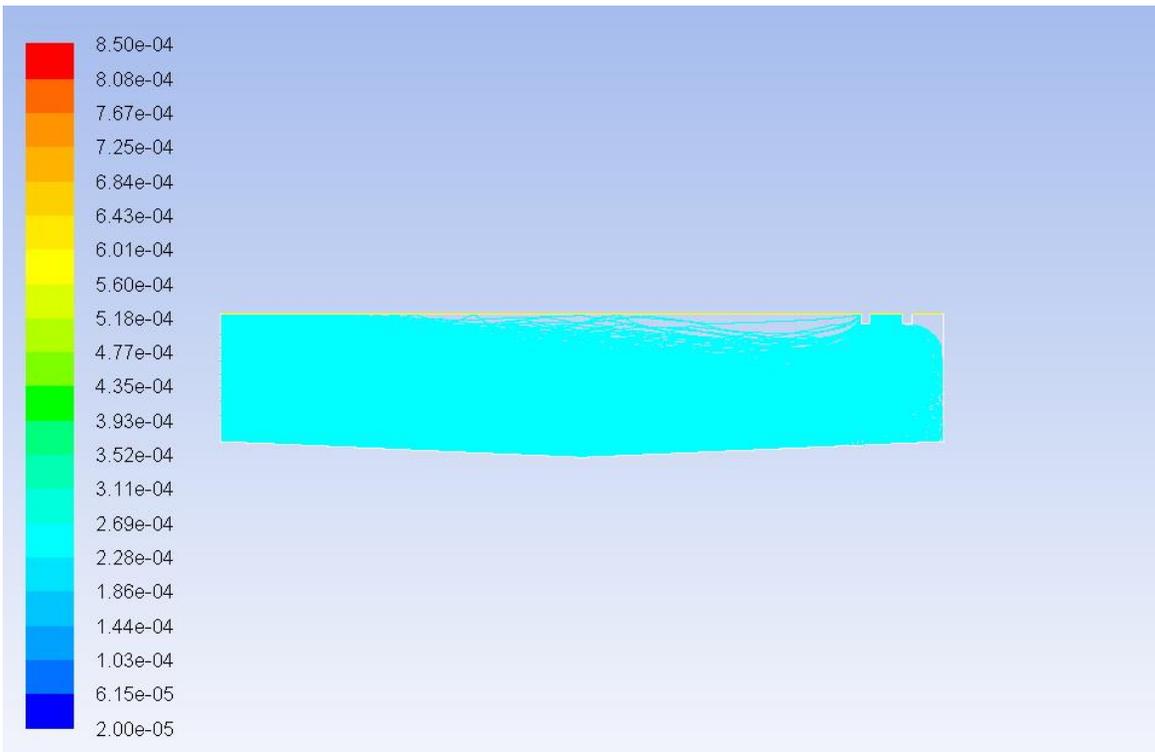


Figura 26 Trayectorias de partículas con diámetros entre 2.28×10^{-4} y 1.86×10^{-4}

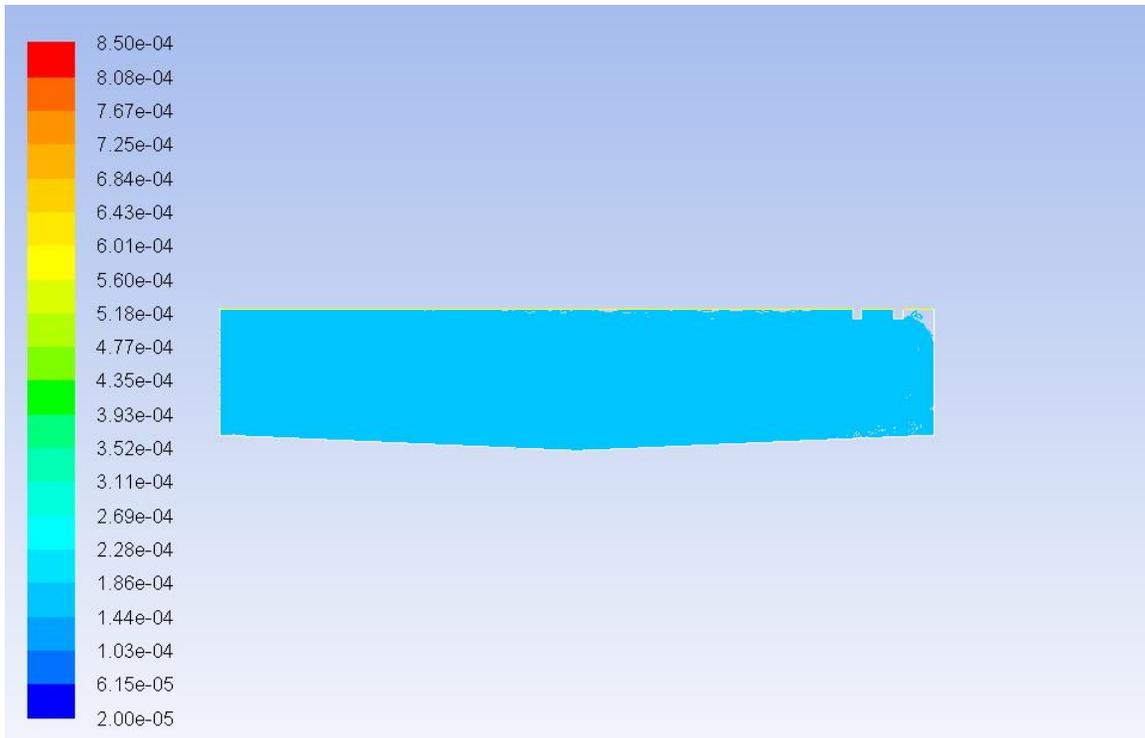


Figura 27 Trayectorias de partículas con diámetros entre 1.86×10^{-4} y 1.03×10^{-4}

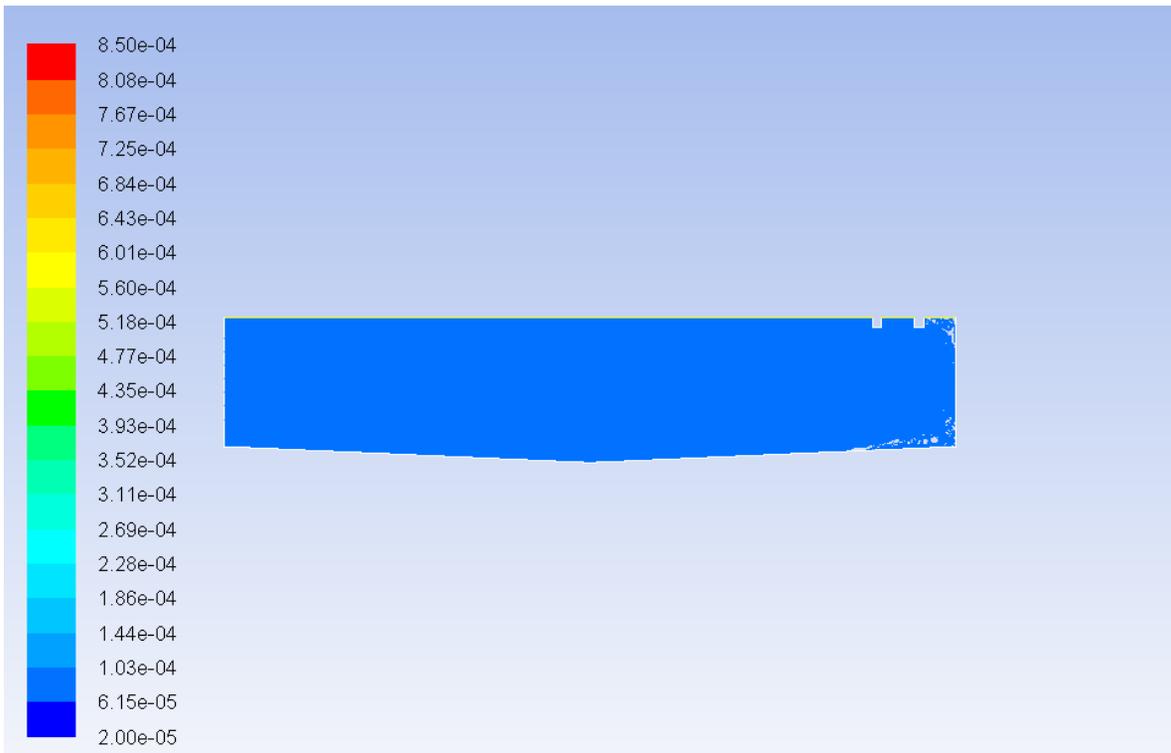


Figura 28 Trayectorias de partículas con diámetros entre 1.03×10^{-4} y 6.15×10^{-5}

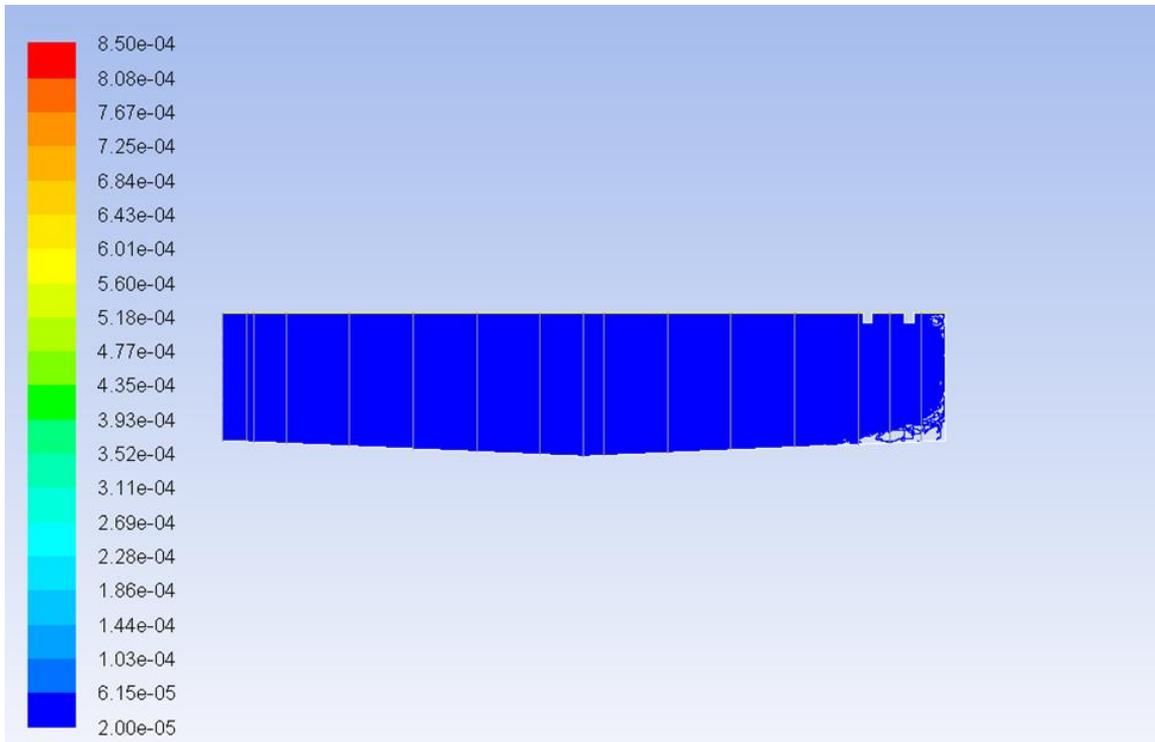


Figura 29 Trayectorias de partículas con diámetros entre 6.15×10^{-5} y 2.00×10^{-5}

Se puede apreciar que para diámetros menores de 2.97×10^{-4} m, se forman trayectorias directas entre la entrada y la salida de la estructura de sedimentación analizada, las cuales a menor tamaño de partículas facilitan el escape de las mismas. Estas partículas se ven afectadas directamente por las líneas de corriente generadas por el flujo, recorriendo la estructura paralelamente a estas últimas y llegando sin dificultad a la zona de salida, especialmente las que entran por los orificios superiores de la pared de entrada.

Analizando los flujos de entrada y salida se puede deducir la eficiencia del sedimentador, así como observar los diámetros sedimentados y escapados. La Figura 30 muestra que, diámetros superiores a 3.66×10^{-4} m se sedimentan en su totalidad en la estructura, mientras que los menores o iguales a este tamaño son escapados. Los porcentajes de los diámetros sedimentados se muestran en la Figura 31.

La eficiencia de la estructura de sedimentación es del 69.89%, calculada a partir del flujo másico, lo que se traduce en el escape de aproximadamente el 30% de las partículas.

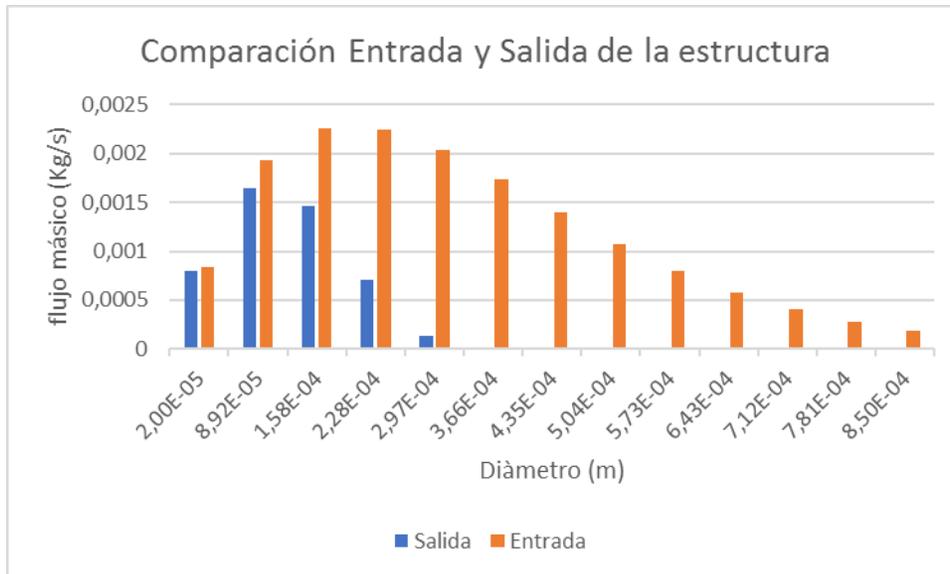


Figura 30 Comparación entre entrada y salida de la estructura (flujo másico)

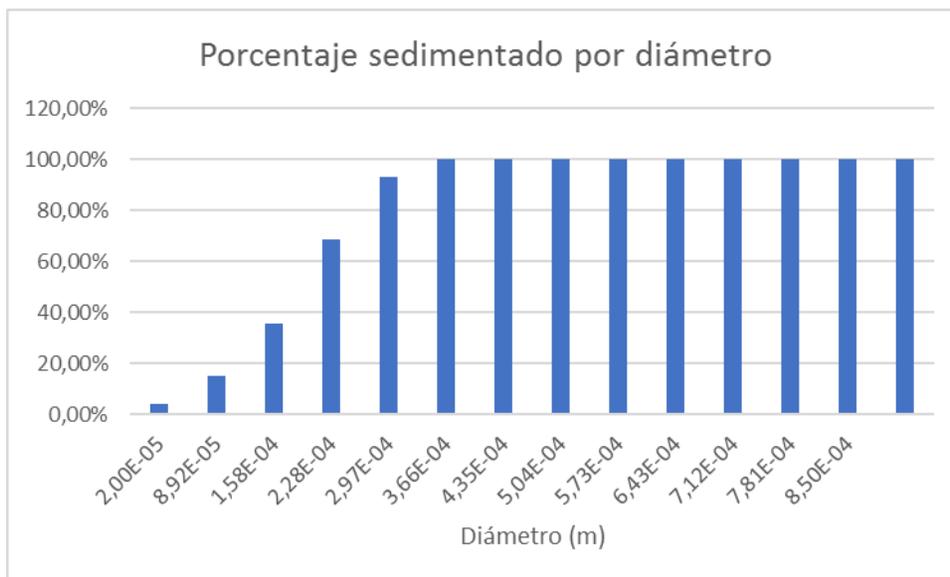


Figura 31 Porcentaje de diámetros sedimentados

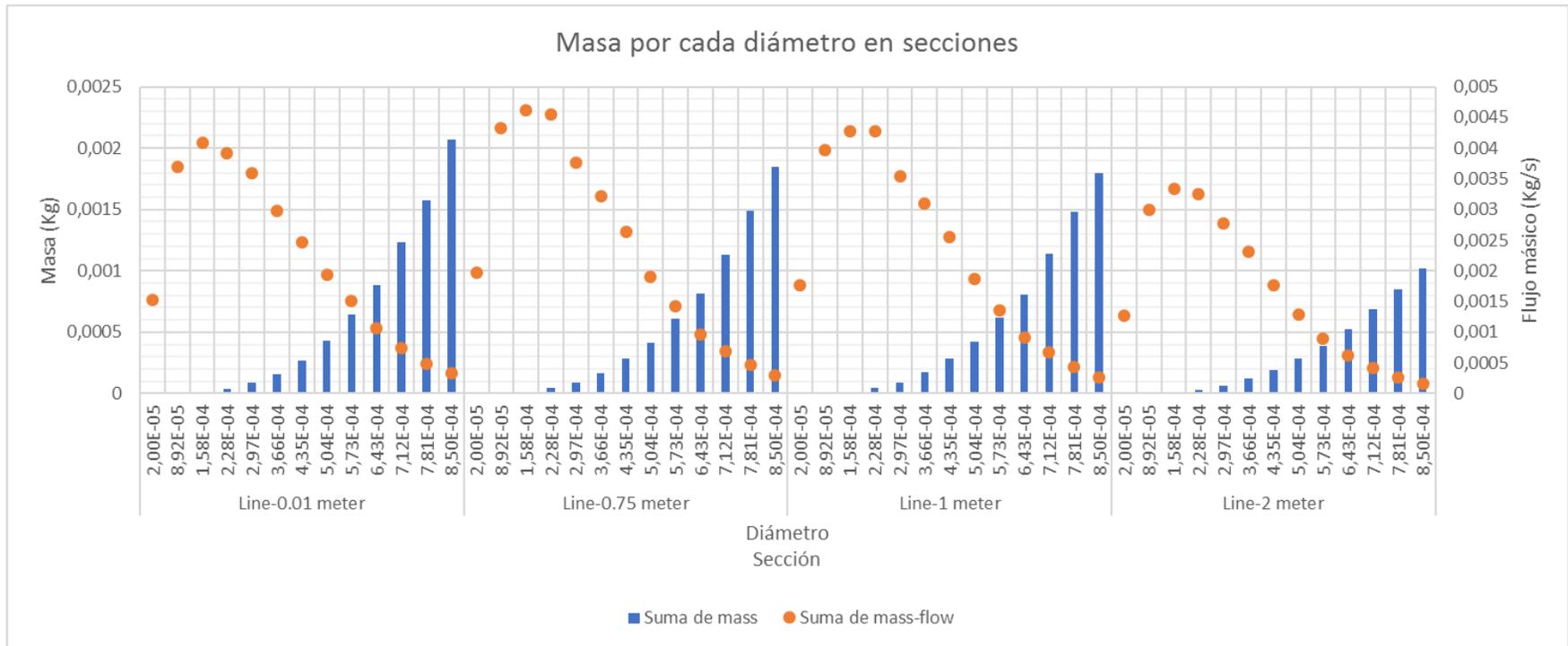


Figura 32 Masa de las partículas por diámetro y sección (0.01 m, 0.75 m, 1.00 m, 2.00 m)

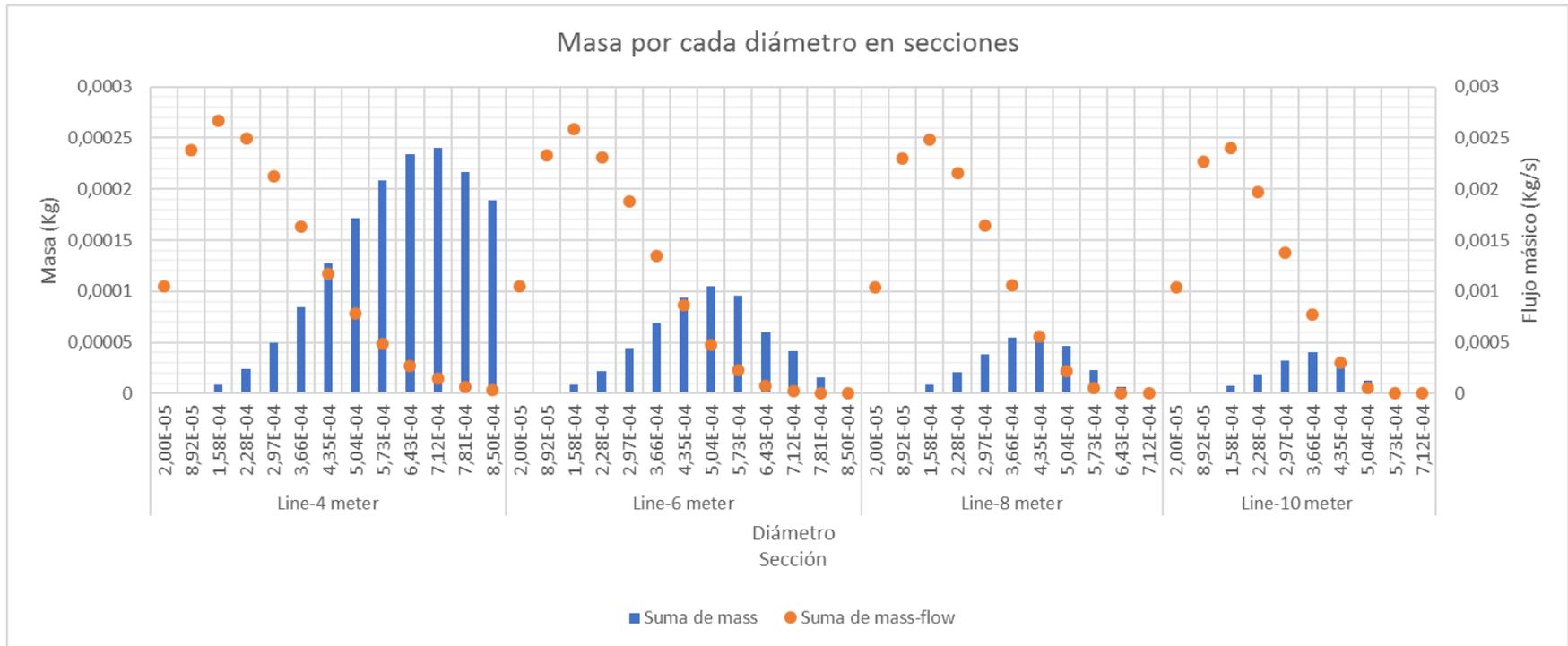


Figura 33 Masa de las partículas por diámetro y sección (4.00 m, 6.00 m, 8.00 m, 10.00 m)

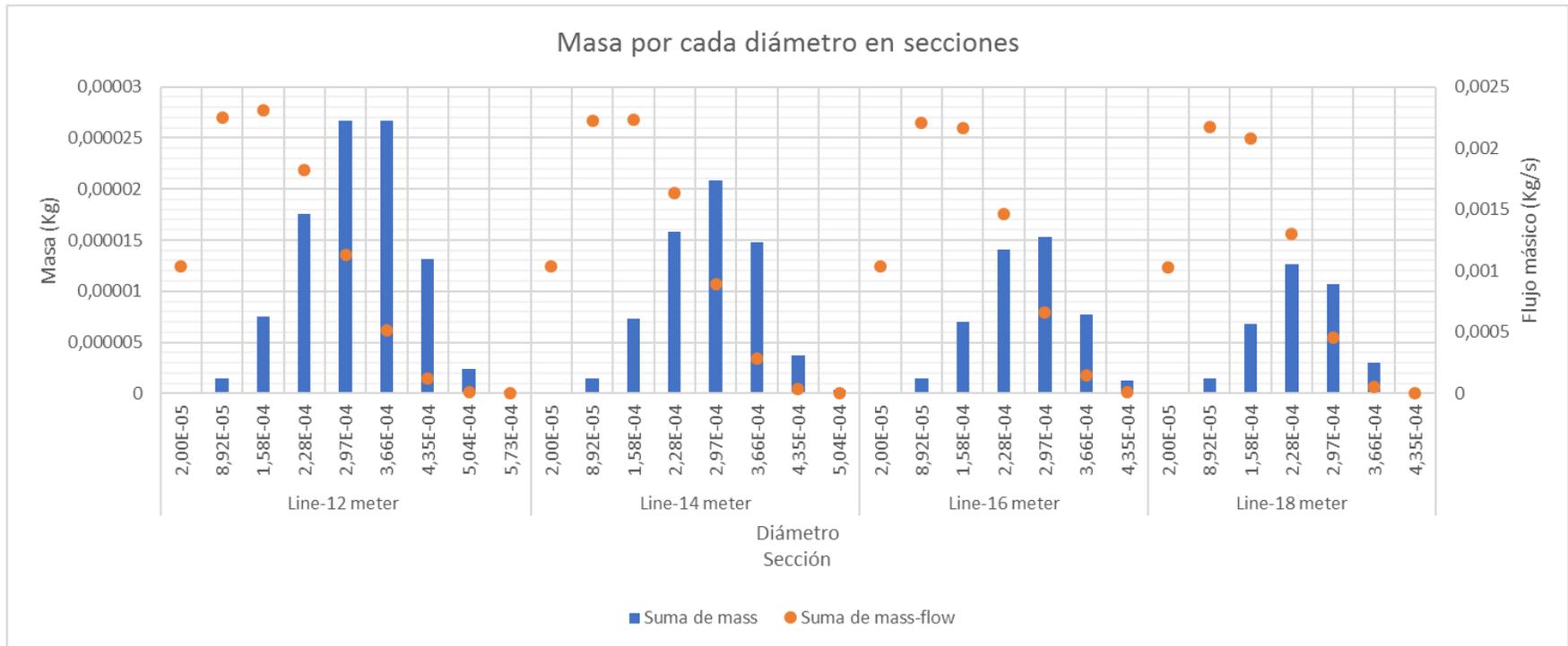


Figura 34 Masa de las partículas por diámetro y sección (12.00 m, 14.00 m, 16.00 m, 18.00 m)

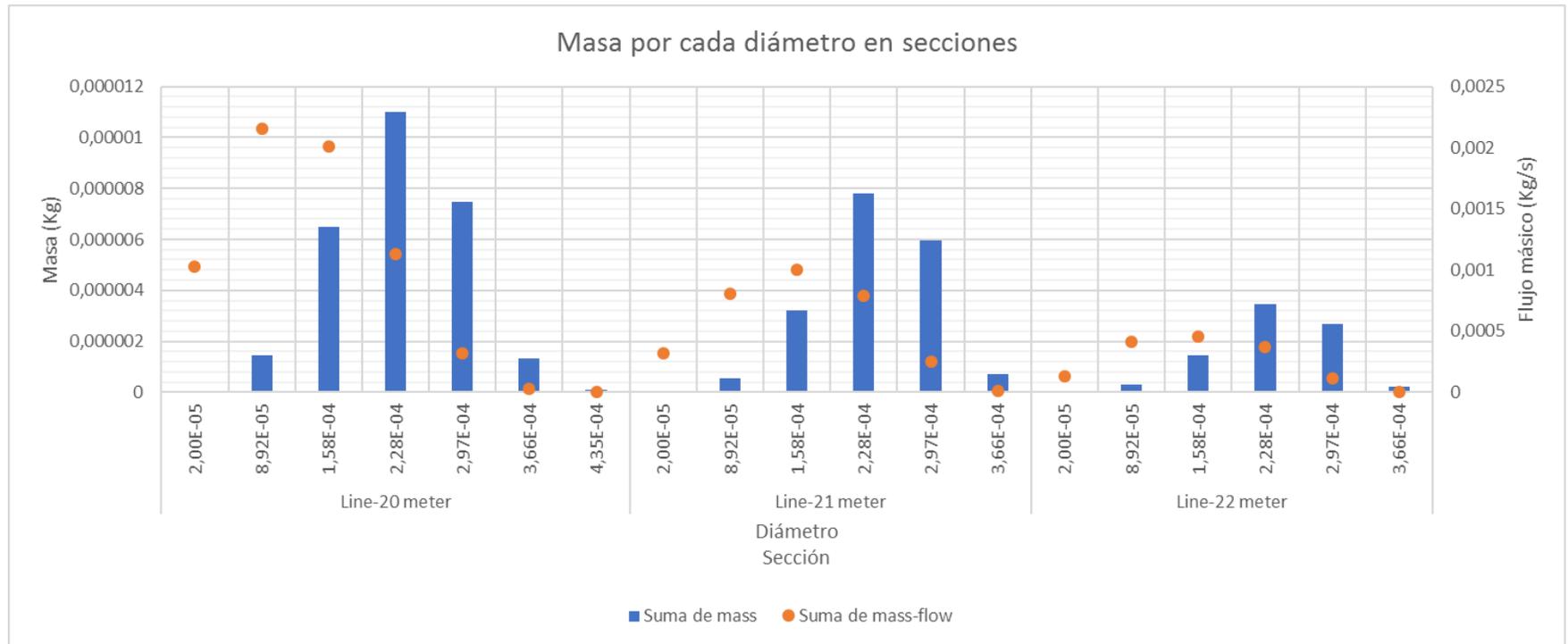


Figura 35 Masa de las partículas por diámetro y sección (20.00 m, 21.00 m,22.00 m)

Capítulo 4 Conclusiones

A continuación, se presentan las conclusiones obtenidas de la realización del presente estudio.

- En el transcurso del estudio, se identificaron diferentes aspectos que de una manera u otra dificultaron el alcance de los objetivos inicialmente planteados. El primero de ellos fue la inexistencia de datos de distribuciones de tamaños de floculos en plantas existentes en Colombia, y la falta de recursos para poder llevar a cabo un estudio adecuado para la consecución de estos en una planta ya construida y sobre los cuales se pudiera llevar a cabo una calibración del modelo, esto conllevó a que el estudio se desarrollara de forma teórica.

Por otra parte, dadas las características del modelo escogido para la simulación de la estructura de sedimentación, se presentaron numerosos problemas para lograr la convergencia del modelo, lo que obligó a utilizar una malla muy fina con celdas del orden de 1.00 cm de lado, esto ocasionó que los requerimientos computacionales fueran excesivos y, dadas las capacidades del equipo con el que se contaba, la simulación final tardó 30 días para lograr la convergencia. La tabla siguiente muestra las duraciones para cada malla utilizada aclarando que con las dos primeras no se logró la convergencia del modelo.

CARACTERÍSTICAS EQUIPO	MALLA	TIEMPO DE SIMULACIÓN
Intel core i5 2.40Hz– 8Gb – Win10pro 64bits	61048 nodos 60489 celdas	17 días
Intel core i5 2.40Hz– 8Gb – Win10pro 64bits	81176 nodos 80496 celdas	20 días
Intel core i5 2.40Hz– 8Gb – Win10pro 64bits	898316 nodos 895584 celdas	30 días

- El objetivo general del presente trabajo era la comparación entre las metodologías de diseño tradicionales, y el uso de CFD para el diseño de estructuras de sedimentación; con los resultados obtenidos es difícil establecer si se puede lograr un mejor diseño haciendo uso de la dinámica de fluidos computacional. Sin embargo, se debe tener en cuenta que en el presente estudio no fue posible analizar todas aquellas variables, que no están consideradas en la teoría tales como corrientes de densidad (térmicas y de concentración), corrientes debidas al

viento y corrientes cinéticas (alteraciones en la entrada, obstrucciones de sedimentación y alteraciones de salida) (Arboleda Valencia, 2000), todos estos aspectos se pueden llegar analizar con un modelo de CFD y haciendo uso de un sistema computacional con las características adecuadas, razón por la cual se considera que el uso de CFD, puede ser útil para el diseño de este tipo de estructuras incorporando las variables descritas anteriormente.

- Aunque no fue posible considerar todas aquellas variables que no se contemplan en las teorías, los resultados del comportamiento hidráulico del sedimentador muestran que la afectación de la entrada de velocidad seleccionada que, aunque se encuentra dentro de lo recomendado por la literatura, se propaga a una distancia a un mayor que los 100 diámetros de los orificios de entrada aspecto que afirma Arboleda (2000) y que se pudo corroborar en este estudio.

Adicionalmente, se pudo apreciar que las canaletas de salida seleccionadas como estructuras de recolección del agua sedimentada, producen una afectación que inicia incipientemente aproximadamente a los 16 m medidos desde la entrada y que, en inmediaciones de las canaletas hace que el flujo alcance velocidades por encima de los 2.00 cm/s recomendados. Lo anterior corrobora las tesis de Arboleda (2000), quien manifiesta que la selección de la estructura de salida del sedimentador puede afectar la eficiencia del mismo, al aumentar la velocidad del flujo y ocasionar la resuspensión del material ya sedimentado.

- De acuerdo con las líneas de corriente obtenidas se puede concluir, que el agua que entra por los orificios superiores tiene un recorrido relativamente más corto que la que entra por los orificios inferiores, lo que afecta la sedimentación de partículas arrastrando los diámetros más pequeños directamente a la salida, generando lo que en la teoría se describe como cortocircuito, esto conlleva a que el proceso de filtración de las plantas de tratamiento complemente el proceso de sedimentación atrapando las partículas de menor tamaño.
- De acuerdo con el análisis de y^+ obtenido en la mayor parte de la longitud de la estructura se encuentra, dentro de los parámetros recomendados por la literatura de ANSYS FLUENT para el modelo de turbulencia $k-\omega$ SST, razón por la cual se asumió que los perfiles de velocidad son razonablemente confiables y se utilizaron para los análisis del presente estudio. No obstante, la generación de mallas más

finas o la adaptación de la malla utilizada pueden generar valores de y^+ dentro del rango recomendado de $3 < y^+ < 10$ a lo largo de todo el fondo de la estructura.

- El análisis del flujo de partículas mostró, que los diámetros mayores a 2.97×10^{-4} se sedimentan en su totalidad. Las partículas que son menores a este tamaño comienzan a verse afectadas por la estructura de salida y el 7.00% de estas se escapa de la estructura. Esto corrobora lo expuesto por Arboleda (2000) quien afirma que la estructura de salida puede generar que las partículas sedimentadas se resuspendan y escapen de la estructura.

Aunque dadas las restricciones del presente estudio, no se puede evaluar la resuspensión de las partículas, si se puede observar que partículas que se acercan al fondo de la estructura son haladas hacia arriba y terminan escapando de la estructura de sedimentación, lo que se puede explicar por el aumento de la velocidad producido por la estructura de salida.

- De acuerdo con los resultados, las partículas con diámetros menores a 30 micrómetros sedimentan solamente el 4.00% de lo inyectado a la estructura, estas partículas recorren la estructura siguiendo casi paralelamente las líneas de corriente que genera el flujo a través del sedimentador, lo que evita que alcancen el fondo de la estructura para que sean consideradas como sedimentadas.
- Otra variable importante que no se analizó y que también puede afectar la eficiencia del sedimentador, especialmente en la decantación de partículas de menor tamaño, es la colisión entre partículas y la agregación de estas, aspecto que como las corrientes de densidad, viento y cinéticas puede ser incluido mediante adecuaciones al modelo realizado.

Trabajo futuro propuesto

Considerando los resultados obtenidos del presente estudio que, como se mencionó con anterioridad, fue desarrollado bajo ciertas limitaciones, surgen diferentes planteamientos para el desarrollo de estudios complementarios los cuales se describen a continuación.

- Se propone realizar un estudio comparativo entre los resultados del presente estudio y otro desarrollado con otros modelos de turbulencia, que requieran menos capacidad computacional con el fin de establecer si realmente es necesario incurrir en los costos computacionales que acarrea el uso del modelo $k-\omega$ SST.

- Se sugiere la elaboración de un estudio que contemple la toma de datos en sedimentadores existentes, analice las distribuciones de tamaños y realice una simulación con CFD, que pueda ser calibrada a partir de datos reales.
- Se propone también estudiar la sedimentación de partículas incluyendo todas aquellas variables que se conocen, pero no han sido incluidas dentro de las metodologías actuales de diseño y que por razones de capacidad computacional no fueron analizadas, tales como corrientes de densidad, corrientes de viento, colisión entre partículas y resuspensión de las mismas, con el fin de contar con estudio completo de comportamiento de una estructura de sedimentación.
- Considerando que las plantas de tratamiento de agua potable son sometidas a cambios en la concentración de las partículas suspendidas en el agua, debido a picos invernales, se sugiere la elaboración de un estudio que, bajo la elaboración de un modelo calibrado de una estructura de sedimentación, analice el comportamiento de esta bajo condiciones de mayor concentración de partículas en agua cruda, con el fin de analizar su verdadera capacidad de retención.
- Adicional a lo anteriormente expuesto, se sugiere un estudio que analice los procesos de sedimentación y filtración de manera conjunta, para evaluar la verdadera capacidad de retención de estos procesos complementarios, dentro del tratamiento de agua potable.

Bibliografía

- Adams, E. W., & Rodi, W. (1990). Modeling flow and mixing in sedimentation tanks. *Journal of Hydraulic Engineering*(116).
- Ali, G., & Kris, J. (2011). Improvement performance of secondary clarifiers by a computational fluid dynamic model. *Slovak Journal of civil engineering*, XIX(4). Al Diwanayah.
- Al-Sammarrae, M., & Chan, A. (2009). Large-eddy simulation of particle sedimentation in a longitudinal sedimentation basin of water treatment plant: Part 2 The effects of baffles. *Chemical Engineering Journal*(152).
- Al-Sammarrae, M., Chan, A., Salim, S., & Mahabaleswar, U. (2009). Large-eddy simulation of particle sedimentation in a longitudinal sedimentation basin of water treatment plant: Part 1 particle settling performance. *Chemical Engineering Journal*(152).
- Anderson, J. (1995). *Computacional Fluid Dynamics The basics with applications*. New York: McGraw-Hill.
- Andersson, B., Andersson, R., Hakasson, L., Mortensen, M., & Van Wachen, B. (2012). *Computational Fluid Dynamics for Engineers*. New York: Cambridge University Press.
- ANSYS Inc. (2016). *Ansys Fluent Theory Guide 14.5*. Canonsburg.
- ANSYS Inc. (2016). *Ansys Fluent Tutorial Guide 14.5*. Canonsburg.
- Arboleda Valencia, J. (2000). *Teoría y practica de la purificación del agua*. Bogotá D.C.: McGraw Hill.
- Azevedo Netto, J. M. (1972). Experiencia brasilera en el diseño de sedimentadores. Asunción Paraguay: Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente CEPIS.

- Bache, D., & Gregory, R. (2010). Floccs and separation process in drinking water treatment a review. *59(1)*. IWA Publisshing.
- Brennan, D. (2001). The numerical simulation of two-phase flows in settling tanks. *Tesis de Doctorado*. Londres: Imperial College of Science, Technology and Medicine.
- Claro, A. (2014). Conception of a new sediment trap system and simulation of particles distribution in a settling basin. Lyon: INSA de Lyon, Departement Genie Civil et Urbanisme.
- Dahl , C., Larsen, T., & Petersen, O. (Septiembre de 1991). Development of a numerical model for secondary clarifiers. *International Association for hydraulic research XXIV Congress*. Madrid.
- De Vantier, B., & Larock, B. (s.f.). Modeling sediment-induced density currents in sedimentations basins. *Journal of Hydraulic Engineering(113)*.
- Dufresne, M. (2008). La modelisation 3D du transport solide dans les bassins en assainissement du pilote experimental a l'ouvrage reel. Starasbourg: Université Louis Pasteur.
- Fuchs, S., Mayer, I., Haller, B., & Roth, H. (2013). Lamella settler for storm water treatment performance and design reomendations. *NOVATECH*.
- Ghawi, A. H., & Kris , J. (2011). A computational fluid dynamics model of flow and settling in sedimertation tanks. *Applied Comuptational Fluid Dynamics*. Prof Hyoung Woo Oh.
- Goula , A. M., Kostoglou, M., Karapantasios, T. D., & Zouboulis, A. I. (2008). The effect of influent temperature variations in a sedimentation tank for potable water treatment A computational fluid dynamics study. *Water Research(42)*.
- Goula, A., Kostoglou, M., Karapantsios, T., & Zouboulis, A. (14 de Septiembre de 2007). A CFD methology for the design os sedimentation tanks in potable water treatment Cas study: The influence of a feed flow control baffle. (140). Thessaloniki. Obtenido de ELSEVIER: www.elsevier.com

- He, C., & Marsalek, J. (2014). Enhancing sedimentation and trapping sediment with a bottom grid structure. *Journal of Environmental Engineering*, 140(1).
- He, C., Wood, J., Marsalek, J., & Rochfort, Q. (2008). Using CFD to improve the inlet hydraulics and performance of a storm water clarifier. *Journal of Environmental Engineering* (134).
- Imam, E., & McCorquodale, J. A. (1983). Simulation of flow in rectangular clarifiers. *Journal of Environmental Engineering*(109).
- Imam, E., McCorquodale, J. A., & Bewtra, J. (1983). Numerical modeling of sedimentation tanks. *Journal of Hydraulic Engineering*(109).
- Inc, F. (2003). *Fluent Incorporated*. Obtenido de <http://jullio.pe.kr/fluent6.1/help/html/ug/node178.htm>
- Jin, Y.-C., Guo, Q.-C., & Viraraghavan, T. (2000). Modeling of class I settling tanks. *Journal of Environmental Engineering*(126).
- Kolodziejczyk, K., Banas, M., & Warzecha, P. (2012). Flow modeling in a laboratory settling tank with optional counter-current or cross-current lamella. *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*, 53(1).
- Krebs, P., Stamou, A., Garcia-Heras, J. L., & Rodi, W. (1996). Influence of inlet and outlet configuration on the flow in secondary clarifiers. *Water Science and Technology*(34).
- Lyn, D., Stamou, A., & Rodi, W. (1992). Density currents and shear-induced flocculation in sedimentation tanks. *Journal of Hydraulic Engineering*.
- Martinez-Solano, F., Iglesias Rey, P., Gualtíen, C., & López Jiménez, P. (2010). Modeling flow and concentration field in a rectangular water tank. *International Congress of Environmental Modelling and Software*. Ottawa, Canada.
- Ministerio de Desarrollo Económico. (2000). Reglamento Técnico del Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico.

- Mohanarangam, K., & Stephens, D. W. (2009). CFD modeling of floating and settling phases in settling tanks. *Seventh International Conference on CFD in the Minerals and Process Industries*. Melbourne, Australia.
- Morin, A., Figue, J.-F., Schaffner, J., & Steinhardt, J. (2008). Advanced mechanical stormwater treatment - Numerical simulations of a counter flow particle separator. *International Conference on Urban Drainage*. Edinburgh.
- Naser, G., Karney, B., & Salehi, A. (2005). Two-dimensional simulation model of sediment removal and flow in rectangular sedimentation basin. *Journal of Environmental Engineering* (131).
- Okoth, G., Centikaya, S., Brüggemann, J., & Thöming, J. (2008). On hydrodynamic optimisation of multi-channel counter-flow lamella settlers and separation efficiency of cohesive particles. *Chemical Engineering and Processing*(47).
- Pathapati, S.-S., & Sansalone, J. (2009). CFD modeling of a storm-water hydrodynamic separator. *Journal of Environmental Engineering*(135).
- Patiño, P., Cruz, C., Torres, P., & Laín, S. (2012). Evaluación hidrodinámica de un clarificador hidráulico mediante indicadores de comportamiento hidráulico y modelos simplificados. *Ingemoería e Investigación*, 32(1).
- Phillips, D., Simon, M., Whipp, S., & Phipps, D. (s.f.). Testing and development of the comb separator for CSO chambers. *NOVATECH 2013*.
- Pope, S. (2000). *Turbulent Flows*. Cambridge University Press.
- Razmi, A., Firoozabadi, B., & Ahmadi, G. (2009). Experimental and numerical approach to enlargement of performance of primary settling tanks. *Journal of Applied Fluid Mechanics*, 2(1).
- Romero Rojas, J. A. (2006). *Purificación del agua* (Segunda ed.). Bogotá: Editorial Escuela Colombiana de Ingeniería.

- Samaras, K., Zouboulis, A., Karapantasios, T., & Kostoglou, M. (2010). A CFD-based simulation study of a large scale flocculation tank for potable water. *Chemical Engineering Journal*(162).
- Schaffner, J., Mayer, I., Eckardt, H., & Steinhardt, J. (s.f.). Model based investigations on the pollution loads of stormwater treatment particle separators. *NOVATECH 2013*.
- Shahrokhi, M., Rostami, F., & Said, A. (2013). Experimental investigation of the influence of baffle position on the flow field, sediment concentration, and efficiency of rectangular primary sedimentation tanks. *Journal of Hydraulic Engineering*, 139(1).
- Shelke, N., Mali, K., & Joshi, S. (2012). CFD Analysis of short retention time clarifier. *Ninth International Conference on CFD in the Minerals and Process Industries*. Melbourne.
- Stamou, A., Theodoris, G., & Xanthopoulos, K. (2009). Design of secondary settling tank using a CFD model. *Journal of Environmental Engineering*(135).
- Tamayol, A., Firoozabadi, B., & Ahmadi, G. (2008). Determination of settling tanks performance using Eulerian-Lagrangian method. *Journal of Applied Fluids Mechanics*, 1(1).
- Van Der Walt, J. J. (Mayo de 2002). The modelling of water treatment process tanks. Johannesburg.
- Versteeg, H. K., & Malalasekera, W. (2007). *An introduction to computational fluid dynamics The finite volume method*. Edinburgh: Pearson Education Limited.
- Wang, Y., Gao, B.-Y., Xu, X.-M., Xu, W.-Y., & Xu, G.-Y. (2009). Characterization of floc size, strength and structure in various aluminum coagulants treatment. *Journal of Colloid and Interface Science*(332).
- Weiss, G. (2013). Innovative use lamella clarifiers for central storm water treatment in separate sewer systems. *Water Science and Technology*.
- Y. G. (2005). *Application of flocs analysis for coagulation optimization at the Split lake water treatment plant*. (D. O. Manitoba, Ed.) Winnipeg, Manitoba, Canada.

YAN, H. (2013). Experimentations et modelisations tridimensionnelles de l'hydrodynamique, du transport particulaire, de la decantation et de la remise en suspension en régime transitoire dans un bassin de retenue d'eaux pluviales urbaines. Lyon: L'Institut National des Sciences Appliquées de Lyon.

Zhang, J.-M., Khoo, B., Lee, H., Teo, C., Haja, N., & Peng, K. (2012). Effects of baffle configurations on the performance of a potable water service reservoir. *Journal of Environmental Engineering*, 138(5).

Zhou, S., McCoquodale, J., & Vitasovic, Z. (1992). Influences of density on circular clarifiers with baffles. *Journal of Environmental Engineering*(118).

Anexo 1 Documento base para el diseño del sedimentador

Anexo 2 Archivos simulación FLUENT de ANSYS