

Simulación de un clarificador secundario del proceso de una planta de tratamiento de aguas  
residuales usando fluido dinámica computacional

Autor

Silvia Alejandra Arias Ortiz

Trabajo de grado para optar el título de Ingeniera Química

Director

Hernando Guerrero Amaya

Ingeniero Químico, MSc, PhD

Tutor

Helver Crispiniano Álvarez Castro

Ingeniero Químico, MSc, PhD

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Fisicoquímicas

Escuela de Ingeniería Química

Bucaramanga

2021

## Dedicatoria

*Principalmente quiero agradecerle a Dios, a la virgencita por acompañarme en cada momento de este proceso, a mi madre por siempre confiar en mí, por su dedicación y amor, a mi nonita Apolonia por siempre apoyarme siempre, por siempre creer en mí y cada día decirme que si podía cumplir mis sueños. Todo esto es para ellas y por ellas: ustedes son el motor de mi vida y son lo mejor de este Universo.*

*A mi familia Arias Ortiz por su incondicional apoyo, en especial a mis tías Yamile y Rocio por siempre motivarme y cuidarme desde siempre. A mis demás tíos Wilson, Alejandro, Ludy, Yesenia Y Dexy por cuidarme siempre y estar al pendiente de mí. A mi nonito Ciro por cuidarme desde pequeña y querer siempre que sea una profesional. Gracias a mis dos hermanos Brayan y Daniela.*

*Finalmente, dedico este trabajo a mis compañeros y amigos que me acompañaron durante la realización de este proyecto. Gracias por sus concejos, motivación, tiempo y ayuda que me brindaron sin todo eso nada hubiese sido posible. Muchas gracias.*

### **Agradecimientos**

A la Universidad Industrial de Santander, por permitirme formarme y culminar esta meta, como miembro de esta gran institución.

A la Escuela de Ingeniería Química, a los administrativos y docentes por apoyarme durante todo este proceso.

Agradezco a AC Ingeniería Virtual por la oportunidad que me dio para realizar este proyecto y por todos los aprendizajes aprendidos, a mi director y tutor quienes depositaron su confianza en mi capacidad de realizar este trabajo de grado.

**Tabla de contenido**

	<b>Pág.</b>
Introducción	
Descripción de la empresa	14
1. Marco teórico	15
1.1. Tratamiento de aguas residuales	15
1.2. Clarificador secundario	16
1.3. Comportamiento Fluido Dinámico CFD	17
1.4. Flujo bifásico	18
1.5. Modelo matemático	18
1.5.1. Ecuación de conservación	19
1.5.2. Ecuaciones de transporte	19
1.5.3. Modelos de turbulencia	20
2. Objetivos	22
2.2. General	22
2.3. Específicos	22
3. Descripción metodológica	23
3.2. Identificación del problema	23
3.3. Pre-procesamiento	23
3.3.1. Definición de geometría del sistema	23
3.3.2. Creación de la malla computacional	24
3.3.2.1. Refinamiento de la malla.	24
3.3.3. Configuración de la simulación	24
3.3.3.1. Modelos físicos.	24
3.3.3.2. Propiedades de los materiales.	25
3.3.3.3. Condiciones de operación y borde.	25

3.3.3.4. Solver.	27
3.4. Procesamiento	28
3.5. Post-procesamiento	28
4. Resultados	30
4.1. Sólido 3D	30
4.2. Malla computacional	32
4.2.1. Refinamiento de la malla	34
4.3 Solución del sistema	35
5. Conclusiones	39
6. Recomendaciones	40
Referencias Bibliográficas	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>

**Lista de tablas**

<b>Tabla 1.</b> <i>Propiedades del fluido.</i> .....	25
<b>Tabla 2.</b> <i>Propiedades de las partículas sólidas.</i> .....	25
<b>Tabla 3.</b> <i>Condiciones de contorno</i> .....	27
<b>Tabla 4.</b> <i>Dimensiones de la geometría del clarificador secundario</i> .....	30
<b>Tabla 5.</b> <i>Datos de la malla computacional</i> .....	34

**Lista de figuras**

<b>Figura 1.</b> Representación del diagrama metodológico.....	28
<b>Figura 2.</b> Estructuras que conforman un clarificador secundario. ....	30
<b>Figura 3.</b> <i>Boceto en 2D del clarificador secundario.</i> ....	31
<b>Figura 4.</b> Geometría final del clarificador secundario. ....	32
<b>Figura 5.</b> Histograma de calidad de malla en el sólido clarificador. ....	33
<b>Figura 6.</b> Evaluación de malla en el interior del sólido clarificador.....	33
<b>Figura 7.</b> Malla de las paredes “Walls”. ....	34
<b>Figura 8.</b> Malla de la superficie de entrada “Inlet”.....	35
<b>Figura 9.</b> Malla de la superficie de salida “Outlet”.....	35
<b>Figura 10.</b> <i>Gráfica de residuales de la simulación del clarificador secundario.</i> ....	36
<b>Figura 11.</b> Contorno de la velocidad en las paredes del clarificador secundario.....	37
<b>Figura 12.</b> Distribución del fluido dentro del clarificador secundario.....	38

### Nomenclatura

Símbolos	Nombre	Unidades
$\rho$	Densidad	$kg/m^3$
$C$	Concentración local en volumen	
$u$	Velocidad	$m/s$
$X$	Coordenada en dirección del flujo	
$S$	Sólido	
$L$	Líquido	
$Q$	Caudal	$m^3/s$
$\tau_{ij}$	Tensores de viscosidad y turbulencia	
$\sigma$	Tensión superficial cte.	
$f\sigma_i$	Tensión superficial	
$t$	Tiempo	
$g$	Gravedad	
$P$	Presión	
$\mu$	Tensor de estrés	
$\alpha$	(fluido 1, densidad 1)	
$\varepsilon$	Energía turbulenta	
$k$	Energía cinética	
$P_k$	Energía cinética turbulenta	

$\mu_t$	Viscosidad turbulenta	
$\sigma_\omega$ y $\sigma_t$	Numero de Prandtl turbulento	
A	Área	$m^2$
R	Radio	$m$
Cp	Calor especifico	$j/Kg.k$

## Resumen

**TÍTULO:** Simulación de un clarificador secundario del proceso de una planta de tratamiento de aguas residuales usando fluido dinámica computacional. \*

**AUTOR:** Silvia Alejandra Arias Ortiz. \*\*

**PALABRAS CLAVE:** Tratamiento de aguas residuales, clarificador secundario, sedimentación, dinámica de fluidos computacional.

Los clarificadores secundarios son muy utilizados en los tratamientos de aguas residuales provenientes de empresas, industrias, domésticas o de agricultura. No obstante, han sido poco empleados en modelos de software de flujo dinámico y en consecuencia son pocos los estudios donde se desarrollen aplicaciones para clarificar aguas residuales con un modelo 3D empleando software con comportamiento fluido dinámico (con sus siglas CFD) e influencia en la una geometría con dimensiones a escala real. Por lo tanto, este trabajo presenta el desarrollo de un modelo computacional con la herramienta ANSYS-FLUENT® Academic, la cual muestra el comportamiento del fluido dentro de la unidad de clarificación secundaria. El análisis CFD es trabajado con el objetivo de predecir si con los datos, los métodos suministrados al sistema y la velocidad encontrada se pueden revelar resultados en donde se logre que los sólidos encontrados en el efluente puedan sedimentarse al fondo del tanque. Para el análisis del CFD del clarificador secundario se establecieron condiciones de contorno: caudal, velocidad, material y sus propiedades y tiempo del proceso aplicados a la superficie de entrada. También se estudian los elementos de discretización de la malla en la geometría del clarificador secundario. Los resultados obtenidos se analizaron mediante contornos y gráficas de velocidad donde se mostró que con un número de iteración y tiempo el sistema se estabiliza y muestra cómo la distribución de la velocidad en el clarificador permite una sedimentación eficiente.

---

\*Trabajo de grado

\*\* Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería Química. Director: Hernando Guerrero Amaya, Ingeniero Químico, Msc, PhD. Tutor: Helver Crispiniano Álvarez Castro, Ingeniero Químico, Msc, PhD.

### Abstract

**TITLE:** Simulation of a secondary process clarifier for a wastewater treatment plant using computational dynamic fluid. \*

**authors:** Silvia Alejandra Arias Ortiz. \*\*

**KEY WORDS:** Wastewater treatment, secondary clarifier, sedimentation, computational fluid dynamics.

Secondary clarifiers are widely used in wastewater treatment from businesses, industries, households or agriculture. However, they have been little used in dynamic flow software models and consequently there are few studies where applications are developed to clarify wastewater with a 3D model using software with dynamic fluid behavior (with its acronym CFD) and influence on a geometry with dimensions on a real scale. Therefore, this paper presents the development of a computational model with the ANSYS-FLUENT Academic tool, which shows the behavior of the fluid within the secondary clarification unit. The CFD analysis is worked with the objective of predicting whether with the data, the methods supplied to the system and the speed found results can be revealed where it is achieved that the solids found in the effluent can settle to the bottom of the tank. For the analysis of the secondary clarifier CFD, boundary conditions were established: flow, speed, material and its process properties and time applied to the input surface. The discretization elements of the mesh in the geometry of the secondary clarifier are also studied. The results obtained were analyzed using contours and velocity graphs where it was shown that with an iteration number and time the system stabilizes and shows how the distribution of the velocity in the clarifier allows efficient sedimentation.

---

\* Bachelor Degree Project

\*\* Faculty of Physicochemical Engineering, School of Chemical Engineering. Director: Hernando Guerrero Amaya, Chemical Engineer, Msc, PhD. Tutor: Helver Crispiniano Álvarez Castro, Chemical Engineer, Msc, PhD.

## Introducción

El agua es uno de los recursos naturales más importantes para los seres vivos y es un elemento de primera necesidad. El hombre para su supervivencia ha encontrado en los recursos naturales una fuente primordial para su vida, pero la falta de conocimientos de las posibles consecuencias que pueden generar el mal uso de estos, ha generado al medio ambiente problemas de contaminación. La ubicación geográfica, la topografía y régimen climático ha caracterizado a Colombia como uno de los países con mayores fuentes hídricas del planeta (León Gómez, 1744).

El crecimiento de la demanda de agua se ha incrementado en los últimos años, en gran parte por el crecimiento poblacional ocasionando a su vez mayor contaminación (Berrío & Ratkovich, 2014). Los contaminantes provenientes de aguas domésticas e industrias han originado problemas tanto ambientales y sociales, por esta razón ha sido una prioridad para el hombre la búsqueda de procesos en los cuales se pueda mitigar y controlar los impactos ambientales provenientes de estas aguas residuales, ya que hoy en día los contaminantes son aún más complejos y más tóxicos tanto para el medio ambiente como para la humanidad. (Raghuvanshi, Bhakar, Sowmya, & Sangwan, 2017).

Por lo anterior, se ha dado lugar a procesos para el tratamiento de aguas residuales, el cual tiene como función remover la mayor cantidad de contaminantes del agua. Este proceso se realiza mediante varias fases: la colección, el tratamiento y disposición donde finalmente se busca encontrar la alternativa más eficiente posible. Estos métodos pueden ser por métodos biológicos y fisicoquímicos (Ingeniería de Tratamiento de Aguas Residuales).

El manejo de aguas residuales se basa en tratamientos primarios, secundarios y terciarios de las aguas, dependiendo de los agentes contaminantes (André & Robalino, 2020). Uno de los procesos que contemplan las etapas para el manejo de aguas se encuentra el clarificador

secundario. Este es el encargado de remover sólidos suspendidos por medio de técnicas químicas, físicas, biológicas y posteriormente la sedimentación.

Al analizar la problemática de la alta contaminación en las fuentes hídricas por parte de las aguas residuales no tratadas y que son vertidas al ambiente se pretende usar métodos innovadores emergentes de las nuevas herramientas tecnológicas en donde se busque mejorar la eficiencia en los equipos industriales de clarificación.

Con la utilización de nuevas herramientas se puede llegar a generar bajos costos en la ejecución de los tratamientos de aguas residuales, la unidad de clarificación secundaria puede tener ventajas al trabajar este proceso por medio de una herramienta tecnológica consistente en el cambio de la dinámica de fluidos computacional o CFD (del inglés Computational Fluid Dynamics). Se trata, entonces, de un modelo de simulación numérica de flujos de fluidos que permite comprender mejor los equipos mediante la mecánica de fluidos y cálculos numéricos. (EquipeSSS, 2016).

En el desarrollo de esta investigación mediante la simulación CFD, en la unidad de clarificador secundario, en una planta de tratamientos de aguas, se ajusta el proceso hidrodinámico teniendo en cuenta cada una de las etapas definidas en los procesos de simulación con CFD. De este modo se consigue un procedimiento más eficiente y menos costoso en el menor tiempo.

### **Descripción de la empresa**

AC INGENIERÍA VIRTUAL S.A.S es una empresa privada de carácter comercial, ubicada en el departamento de Santander, localizada en la ciudad de Bucaramanga.

Se constituye como una empresa después de ganar la convocatoria 523 de Colciencias, con apoyo de la corporación Bucaramanga emprendedora y la colaboración como aliado tecnológico de fluido dinámica computacional (L-CFD) UNICAMP- Brasil. La empresa está constituida como sociedad por acciones simplificadas enfocada en investigaciones y desarrollos experimentales en el campo de las ciencias naturales y la ingeniería.

AC INGENIERIA VIRTUAL, nace en el 2012 como un EBT, es una empresa con una alta experiencia en la Ingeniería 4.0, la cual brinda servicios en tres líneas como, simulación computacional, automatización e inteligencia artificial y desarrollo de productos de innovación tecnológica aplicados a la industria.

Dedicada al modelamiento, simulación y virtualización de procesos industriales, utilizando técnicas de última generación numérica, automatización e inteligencia artificial. Se caracteriza por posibilitar la conexión de conocimiento entre el conocimiento desarrollado en las instituciones I+D

## **1 Marco teórico**

En los procesos químicos para el cuidado ambiental existen múltiples posibilidades y recursos. Aunado a esto, también hay perspectivas tecnológicas que inciden en las variaciones químicas. Para el caso del saneamiento de aguas residuales existen una gran variedad de técnicas, métodos y herramientas que involucran aspectos físicos y químicos. No obstante, para el caso del tratamiento de aguas residuales, si bien las posibilidades son muchas, este trabajo se ha enfocado en un procedimiento por medio de las nuevas tecnologías software con Comportamiento Fluido Dinámico.

Para entender el desarrollo de esta investigación, es necesario, conocer los elementos que hacen parte del proceso y su dinámica, para lo cual, a continuación, se presentan las explicaciones sobre: el tratamiento de aguas residuales, el clarificador secundario, el Comportamiento Fluido Dinámico.

### **1.1 Tratamiento de aguas residuales**

El acceso al agua potable es considerado un derecho. No hay nada que sustituya el agua para los seres vivos (Estud & Socio-Juríd, 2009). El cuidado y preservación de las fuentes hídricas es sin lugar a duda de gran importancia para el ser humano. Colombia es uno de los países con un gran porcentaje de fuentes hídricas gracias a sus diversos clima y geografía.

Las aguas provenientes de industrias, hogares y de agricultura están cargadas de un alto grado de contaminantes, puesto que las aguas provenientes de estas zonas contienen agentes que no se degradan fácilmente al ser vertidas a ríos, quebradas y demás. Los sistemas de tratamientos de aguas residuales son un mecanismo encargado de eliminar sólidos y materia orgánica por medio de procesos físicos, químicos y biológicos en donde se busca retirar la mayor cantidad de contaminantes suspendidos en el agua. El procedimiento de limpieza del agua a tratar depende del

tipo de contaminantes contenidos, lo que genera que existan etapas como: la preliminar, la primaria, la secundaria y la terciaria.

La etapa preliminar se encarga de regular y medir el agua residual antes de ser ingresada a la planta donde se eliminan los compuestos volátiles presentes mediante una pre-aireación. Este procedimiento se debe realizar antes de ser llevada al estudio de tratamientos ya que se tiene como finalidad disminuir olores y aumentar el oxígeno en el agua. (Fibras y Normas de Colombia, S. A. S., 2018).

Para iniciar el proceso de la planta de tratamientos se comienza con la etapa primaria en donde el propósito es eliminar los sólidos suspendidos por sedimentación gravitatoria. En la segunda etapa se elimina la materia orgánica mediante procesos biológicos, en donde participan los microorganismos en diferentes fases para que así, finalmente, en la tercera etapa se ejerza el cumplimiento de los estándares de agua requeridos. (Fibras y Normas de Colombia, S. A. S., 2018).

## **1.2 Clarificador secundario**

La unidad de procesos de clarificación secundaria incluida en etapa secundaria del tratamiento de aguas residuales, es una unidad de tratamiento que remueve partículas por medio de la gravedad (Díaz et al., 2009). Dentro del proceso de tratamiento de aguas, el clarificador primario es el encargado de reducir entre el 25%-30% de los contaminantes provenientes de las aguas residuales, pero en un clarificador secundario el porcentaje de eficiencia depende los sólidos suspendidos presentes en las aguas salientes (SERECO, 2012).

La unidad de procesos de clarificación de agua secundaria se encuentra dentro de la etapa de lodos activados, después del tratamiento biológico separando el agua y el lodo presente en el licor; la mezcla entra al sistema y, después del proceso, el líquido clarificado es llevado por el

vertedero por la parte superior, mientras que el lodo sedimentado es recirculado al sistema por el fondo.

Existen varios tipos de clarificadores secundarios. Dependiendo de la planta se especifica cuál de estos es más eficiente en el proceso. Dentro de ellos se encuentra los clarificadores de placa inclinada, en el cual su eficiencia de asentamiento de los sólidos aumenta debido al área superficial. Este tanque clarificador es muy utilizado por el espacio de instalación. Los clarificadores secundarios rectangulares hacen parte de esta clasificación y son usados para grandes plantas de tratamiento residual. Su costo es bajo, pero necesita un mayor tiempo de asentamiento. Finalmente, el clarificador circular característico por su corto tiempo de retención y sus mejores efectos de retención. (Tanques clarificadores, 2016).

### **1.3 Comportamiento Fluido Dinámico CFD**

Los nuevos procesos de clarificación secundaria son representados matemáticamente por ecuaciones de transporte o conservación. Un sistema acoplado a estas ecuaciones es el sistema con Comportamiento Fluido Dinámico (con sus siglas CFD) el cual busca el desarrollo e innovación de la industria de tratamientos, permitiendo que los procesos además de ser más rápidos sean mucho más eficientes. El uso de la simulación computacional permite que los sistemas de tratamientos puedan aumentar el desarrollo en las etapas del procesamiento y con ello se logra introducir mejoras en sus productos y en el manejo que les dan a los equipos como, por ejemplo, a la unidad de clarificación secundaria.

La Dinámica de Fluido Computacional (CFD) es una técnica que detalla las propiedades de los fluidos a través del uso de ecuaciones diferenciales de masa y momento que se resuelven haciendo uso de los principios fundamentales de los fluidos y los métodos numéricos. Con esto, además, se consigue agilizar las operaciones y desarrollar productos con estándares establecidos.

Por otra parte, la CFD es una herramienta valiosa que contribuye en gran medida en el desarrollo de ecuaciones que se hacen difíciles de resolver por la interacción entre partículas y geometría.

Las aplicaciones de la CFD en el área de ciencia y tecnología son amplias. Dentro de las aplicaciones se encuentra la industria automotriz (diseño de autos), aeronáutica (diseño de aviones) y en general la mecánica (diseño de bombas, motores compresores), industria química y petroquímica (reactores, mezcladores, etc.) (LOPEZ, 2015).

#### **1.4 Flujo bifásico**

El flujo bifásico entre sistemas líquidos-sólidos granulares (conocidos como *slurry flow*) (Flujo a dos fases sistema sólido líquido) está enfocado a la determinación de la caída de presión, patrón del flujo, velocidad y las propiedades del flujo en sus fases. El diseño de este sistema contiene interacciones entre el fluido y las partículas, por lo cual es importante detallar el fenómeno encontrado en cada sistema.

El estudio del flujo bifásico sólido-líquido es complejo y por esto es necesario estudiar principalmente los esfuerzos de fricción que pueden desarrollarse en flujo laminar o turbulento, al mismo tiempo la interacción de las partículas sólidas y el líquido. Dentro de este proceso se aborda la distribución de las partículas las cuales se pueden dar de manera homogénea o heterogénea.

En un clarificador secundario de PTAR el flujo trabaja reológicamente equivalente, lo que genera simplificaciones dentro del análisis del fluido los cuales llevan a estudiar el comportamiento de la concentración que puede tener un comportamiento no-newtoniano (TAMBURRINO ALDO, 2010).

#### **1.5 Modelo matemático**

El proceso de clarificación secundaria se representa matemáticamente por un sistema de ecuación de transporte y conservación. Las ecuaciones gobernantes son las siguientes:

### 1.5.1 Ecuación de conservación

Según la teoría de flujos de mezclas de sólidos y líquidos la ecuación tiene en cuenta el esfuerzo dispersivo de Bagnold, donde se plantea relaciones que contienen el flujo en fase sólida y líquida. Tamburrino Aldo, (2010) tomo ecuaciones de conservación que están referidas las ecuaciones de continuidad y momentum, aplicada a la fase sólida y líquida del fluido. A continuación, se presentan las ecuaciones:

$$\text{Continuidad de la fase sólida: } \frac{\partial}{\partial t}(C\rho_s) + \frac{\partial}{\partial x}(C\rho_s u_s) = 0 \quad (\text{Ec. 1})$$

$$\text{Continuidad de la fase líquida: } \frac{\partial}{\partial t}((1-C)\rho_L) + \frac{\partial}{\partial x}((1-C)\rho_L u_L) = 0 \quad (\text{Ec. 2})$$

### 1.5.2 Ecuaciones de transporte

La ecuación de continuidad en coordenadas cartesianas puede ser expresada como la Ecuación 3, asumiendo que la densidad es constante para fluidos incompresibles. (André & Robalino, 2020).

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \rho \frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (\text{Ec. 3})$$

La ecuación de conservación de cantidad de momento se muestra en la Ecuación 4

$$\frac{\partial (\rho u_j)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i u_j) = -\frac{\partial P}{\partial x_j} + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} (\tau_{ij} + \tau_{tij}) + \rho g_j + f \sigma_i \quad (\text{Ec. 4})$$

(I)      (II)                      (III)                      (IV)                      (V)                      (VI)

Dónde: (I) Cambio local con el tiempo, (II) Convección de momento, (III) Fuerza superficial, (IV) intercambio de momento dependiente molecular (difusión), (V) Fuerza de masa, (VI) Tensión superficial.

André & Robalino (2020), en la ecuación 5 representa la interface:

$$\frac{\partial \alpha}{\partial t} + \frac{\partial (\alpha u_j)}{\partial x_j} = 0 \quad (\text{Ec. 5})$$

### 1.5.3 Modelos de turbulencia

Para desarrollar los sistemas matemáticos, es necesario conocer los modelos de turbulencia los cuales surgen cuando existe una inestabilidad en el flujo. Reynolds (1895) aproxima que una inestabilidad se considera como turbulencia. Debido a esto se deducen las ecuaciones que se basan de Navier-Stokes promediadas en el tiempo (Capítulo iii metodología). Las aplicaciones están basadas en modelos Standard  $k-\varepsilon$ ,  $k-\varepsilon$  Realizable,  $k-\omega$  SST (*Shear Stress Transport*) y RMS (*Reynolds Stress Model*).

#### Modelo $k-\varepsilon$

Este modelo se basa en ecuaciones de transporte de energía cinética ( $k$ ) y disipación de energía turbulenta ( $\varepsilon$ ). En la derivación de este modelo se asume que el flujo es totalmente turbulento y los efectos de viscosidad molecular se consideran despreciables (*Capítulo iii, metodología*). Las ecuaciones matemáticas para este modelo  $k-\varepsilon$ .

Energía cinética turbulenta ( $k$ ):

$$\frac{\partial (\rho k)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho v k) = \nabla \cdot \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \nabla k \right] + P_k - \rho \varepsilon \quad (\text{Ec. 6})$$

$$\frac{\partial (\rho \varepsilon)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho v \varepsilon) = \nabla \cdot \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \nabla \varepsilon \right] + \frac{\varepsilon}{k} C_{\varepsilon 1} P_k - \frac{\varepsilon^2}{k} C_{\varepsilon 2} \rho \quad (\text{Ec. 7})$$

#### Modelo $k-\omega$ ( $k-\omega$ )

Es el modelo más completo y contiene la razón de disipación de energía por unidad de volumen y tiempo. Las ecuaciones para el modelo son:

$$\frac{\partial (\rho k)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho v k) = \nabla \cdot \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \nabla k \right] + P_k - \beta \rho \varepsilon \quad (\text{Ec. 8})$$

$$\frac{\partial (\rho\omega)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho v\omega) = \nabla \cdot \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\omega} \right) \nabla \omega \right] + \alpha \frac{\omega}{k} P_k - \beta \pi \rho \quad (Ec. 9)$$

### Modelo k-omega SST (k- $\omega$ )

Es un modelo conformado por las ecuaciones de turbulencia y tasa de disipación (André & Robalino, 2020), el procedimiento es automático facilitando la creación de malla en la pared.

Dentro de las ecuaciones que rigen este modelo se encuentran las expresiones (10) y (11).

$$\frac{\partial (\rho k)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho v k) = \nabla \cdot \left[ \left( \mu + \sigma_t \mu_t \right) \nabla k \right] + P_k - \beta \rho K \omega \quad (Ec. 10)$$

$$\frac{\partial (\rho\omega)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho v \omega) = \alpha \rho S^2 - \beta \rho \omega^2 + \nabla \cdot \left[ \left( \mu + \sigma_\omega \mu_t \right) \nabla \omega \right] + 2(1 - F_1) \rho \sigma \omega^2 \frac{1}{\omega} \nabla_k \nabla_\omega \quad (Ec. 11)$$

Para que el proceso simulado CFD se desarrolle de forma adecuada deben realizarse una serie de etapas que son independientes del tipo de proceso que se vaya a desarrollar (Macías Hernández, 2015):

1. **Identificación:** En esta etapa se debe definir el objetivo principal de la simulación, especificando los rangos hasta donde se quiere llegar “inicio y fin”.
2. **Pre-procesamiento:** Se toman las decisiones con respecto a la geometría “2D, 3D”, al mismo tiempo se trabaja el tipo de mallado a utilizar teniendo en cuenta la física, y por último la configuración que se debe tener en el solver con sus respectivas condiciones, propiedades y análisis del material a trabajar.
3. **Procesamiento:** En este punto de la simulación se calculan los datos buscando las soluciones requeridas.
4. **Post-procesamiento:** Finalmente se examinan los resultados obtenidos verificando si se logró cumplir el objetivo establecido, de no ser así se procede a realizar las modificaciones pertinentes.

## **2 Objetivos**

### **2.2 General**

Desarrollar un modelo de simulación para un clarificador secundario de una planta de tratamiento de aguas residuales mediante la dinámica de fluidos computacional (CFD).

### **2.3 Específicos**

Identificar en la unidad de clarificación las principales variables de operación y descripción de la unidad.

Validar los resultados de la simulación desarrollado con datos experimentales o de literatura.

Proponer soluciones de ingeniería para el mejoramiento de la unidad de clarificación.

### **3 Descripción metodológica**

En el desarrollo de este proyecto se estudió el desempeño de un clarificador secundario con Comportamiento Fluido Dinámico (CFD) mediante la herramienta ANSYS-FLUENT® Academic. El estudio contempló las condiciones hidráulicas y ambientales relacionadas con aguas residuales. Encontrar una solución donde el proceso unitario sea eficiente es fundamental, por esta razón se siguieron las etapas de procesamiento establecidas para una simulación CFD.

#### **3.2 Identificación del problema**

El presente trabajo se realizó analizando el comportamiento fluido dinámico (CFD) para un sistema de clarificación secundario de aguas residuales. Este proceso se desarrolló por medio de una serie de etapas, en primer lugar, dentro del proceso de la unidad se busca identificar si la velocidad del fluido conlleva a un proceso de sedimentación eficiente con respeto al tiempo. El modelo fue validado a partir de la propuesta desarrollada por André & Robalino (2020)

#### **3.3 Pre-procesamiento**

Se definieron los objetivos para generar la simulación. Este fue el comienzo del desarrollo del sistema de clarificación secundaria. En este sentido, se dio paso a la realización de la creación de la geometría, malla computacional y configuración de la simulación. Luego de ello, se puso en marcha el estudio. Lo anterior es necesario para dar lugar al suministro de datos de entrada y el análisis de los modelos físicos necesarios, así se podrán realizar las respectivas simplificaciones y evaluar las condiciones de borde.

##### **3.3.1 Definición de geometría del sistema**

En el proceso de simulación CFD los cálculos necesarios son complejos, por este motivo el siguiente paso es la creación de geometría 3D de la unidad, esto es la estructura del clarificador secundario. La mencionada estructura 3D se realizó mediante SpaceClaim (incluido en la

plataforma del Workbench de ANSYS-FLUENT® Academic). En este diseño se realizaron las debidas adecuaciones con respecto a la entrada, salida y superficies del sistema.

### **3.3.2 Creación de la malla computacional**

Por medio de la geometría del clarificador secundario se realizó el mallado utilizando elementos tetraédricos de calidad dependiendo del interés de la región. Este estudio tuvo que realizarse con la mayor precisión por medio de Ansys-Meshing (incluido en la plataforma del Workbench del FLUENT®) en cumplimiento de los estándares de calidad necesarios en la unidad de proceso, permitiendo una discretización inicial del dominio de la malla.

**3.3.2.1 Refinamiento de la malla.** Se realizó un ajuste y refinamiento de la malla, donde por medio de Mesh se insertó Method el cual se encargó de controlar el algoritmo y tipo de malla en todo el sólido con elementos tetraédricos en las paredes y finalmente se realizó un ajuste y refinamiento de la malla con los criterios de evaluación encontrados.

### **3.3.3 Configuración de la simulación**

Mediante la interfaz set-up (incluido en la plataforma de ANSYS-FLUENT® Academic), se procedio a definir los materiales establecidos y las propiedades adecuadas del sistema. En primera instancia se determina que el procesamiento debe trabajar en paralelo y con unidades del sistema internacional (abreviado universalmente como SI).

**3.3.3.1 Modelos físicos.** Es necesario para el desarrollo del modelo especificar con qué régimen se trabajará. En este caso el régimen de flujo turbulento seleccionado fue SST (*Shear Stress Transport*), ya que este modelo se caracteriza por explicar modelos turbulentos de manera completa por medio de ecuaciones de transporte (*Capítulo iii metodología*).

En cuanto al modelo de fase discreta de las partículas sólidas, se realizó por medio de la interacción con la fase continua en la superficie de entrada.

**3.3.3.2 Propiedades de los materiales. Fluido:** La unidad de proceso de clarificación secundaria trabaja con los datos que proporciona el agua (líquida) como fluido principal y sólidos suspendidos como partículas discretas dentro la herramienta FLUENT, el cual es objeto de estudio.

**Tabla 1**

*Propiedades del fluido.*

Características	Unidades	Agua
Densidad	$Kg/m^3$	998.2
Viscosidad	$Kg/m.s$	0.001003
Calor específico (Cp.)	$j/Kg.k$	4182
Conductividad térmica	$w/m.k$	0.6

Nota. Información tomada de Ansys Fuent Academic

**Partículas sólidas:** Las partículas flocculantes trabajadas mediante la fase discreta fueron inyectadas teniendo en consideración que son sólidos orgánicos e inorgánicos que influyen en la velocidad de sedimentación. Dado esto se estimó la densidad cercana a trabajar por medio de la inyección de fase discreta. El diámetro de las partículas tiene un rango de 0,001-5 mm, los cuales dependen del gradiente de velocidad y el tiempo de retención. Con esto se estimó que propiedades a trabajar las partículas en suspensión. (Yactayo, n.d. ).

**Tabla 2.**

*Propiedades de las partículas sólidas.*

Características	Unidades	Sólidos
Densidad	$Kg/m^3$	2600
Tasa de flujo	$Kg/s$	0.000006
Calor específico (Cp.)	$j/Kg.k$	795
Diámetro	m	0.005

Nota. Información tomada de Yactayo, n.d.

**3.3.3.3 Condiciones de operación y borde. Fluido (agua líquida):** Cumpliendo con la descripción del modelo, es necesario definir las condiciones de operación y borde las cuales están asociadas con el estudio. Se definirá la presión y velocidad dentro del sistema para completar el cierre de las ecuaciones del sistema CFD. Las superficies de importancia a tratar se encuentran la entrada (Inlet), salida (Outlet) y paredes (Walls) del clarificador secundario.

**Inlet:** En la entrada del agua al sistema se tomó en consideración un gradiente de presión igual a 0, una intensidad de turbulencia del 5% y una relación de viscosidad de 10. Con respecto a la velocidad de entrada se tomó como referencia el caudal con un valor de 0.0008 l/s. La tubería de entrada de agua al sistema se realiza mediante una tubería de 0.0508 m, que se dirige a la estructura rompe presión ubicada en el centro con un diámetro 0.38 m de diámetro. Correspondiente con esto se procedió a realizar el cálculo de velocidad de entrada mediante:

$$Q = A * V \quad \text{Ec. 12}$$

$$A = \pi * r^2 \quad \text{Ec. 13}$$

Área de entrada

$$A = \pi * (0.0254 \text{ m})^2$$

$$A = 0.002 \text{ m}^2$$

Velocidad de entrada

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

$$V = \frac{0.0008 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}}{0.002 \text{ m}^2}$$

$$V = 0.4 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Dentro de Boundary conditions de FLUENT®), el valor de la velocidad se ingresó en las coordenadas (x y z) dando un valor de la velocidad de (0 -0.4 0).

**Outlet:** Con respecto a la salida del sistema André & Robalino, (2020) estableció un valor para la presión manométrica de 0 en el ámbito despresurizado. La velocidad de salida (outlet) está contemplada con respecto al flujo de entrada en la tubería de salida con dimensiones de dos pulgadas.

Finalmente, con respecto a las paredes del clarificador secundario “Wall functions” se consideró una condición estacionaria y no deslizamiento la cual viene contenida en FLUENT®.

**Tabla 3.**

*Condiciones de contorno.*

Condiciones Iniciales		Agua	Sólidos
Entrada	Caudal (L/s)	0.8	
	Velocidad (m/s)	0.4	0.4
	Presión de Gauge (Pa)	0	0
Salida	Velocidad (m/s)	0.4	
	Presión de Gauge (Pa)	0	
Paredes	No deslizamiento ( <i>No Slip Wall</i> )		

Nota. Información tomada de André & Robalino, (2020)

**3.3.3.4 Solver.** Se procedió a resolver los problemas numéricos en FLUENT, teniendo en consideración las ecuaciones que rigen la dinámica de fluidos. Se estableció el algoritmo Simple de segundo y primer orden, gracias a este se puede lograr una mejor solución respecto a la velocidad, disipación y energía cinética, variables de gran importancia en el estudio a desarrollar (*Capítulo iii, metodología*).

Para la operación de solver se tuvo en cuenta un número dado de iteraciones dentro del sistema, donde finalmente el estudio de iteración en las variables estudiadas se debe estabilizar. Al mismo tiempo, dentro del solver se trabajó con respecto a las variables propuestas por André & Robalino (2020), donde se evidencia que la simulación se trabaja en rangos de tiempo de 300 s.

### **3.4 Procesamiento**

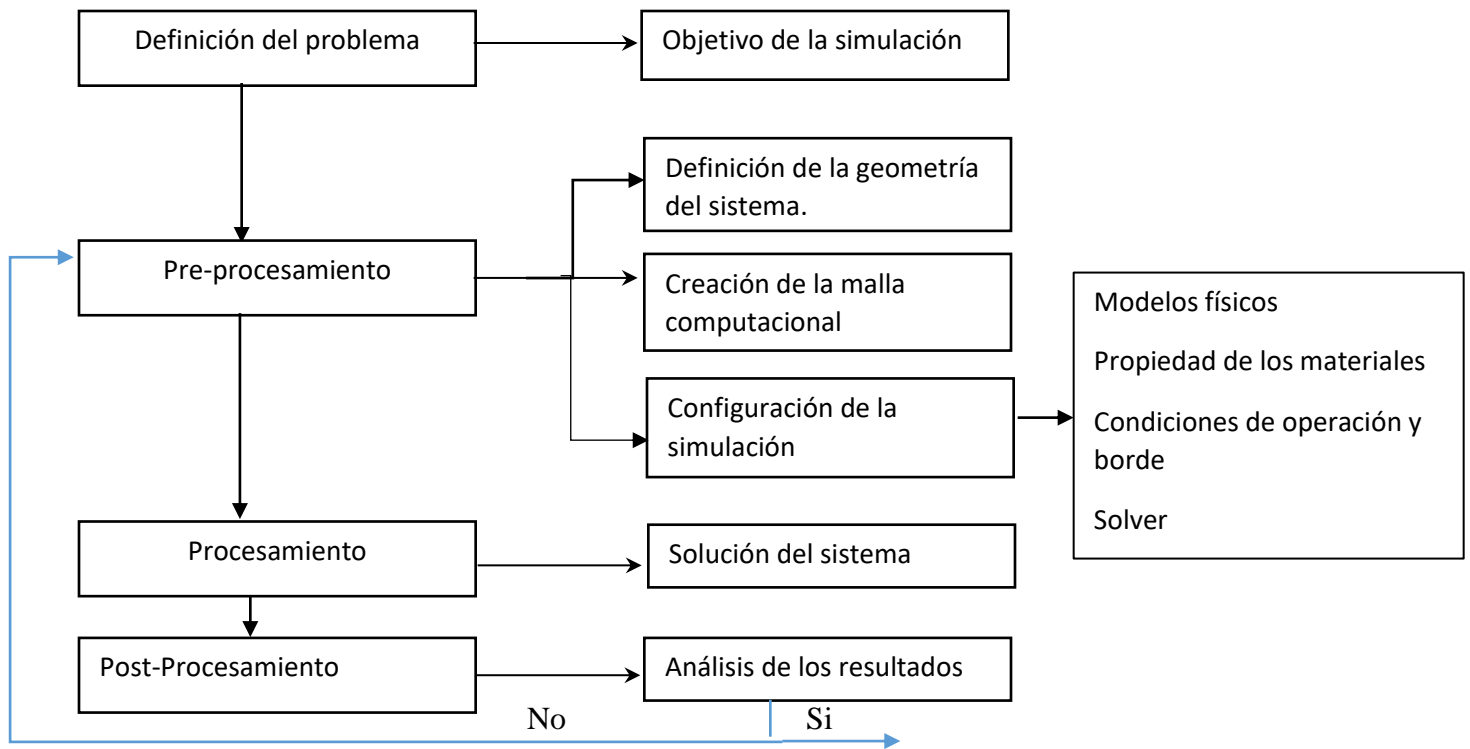
Dentro del procesamiento ANSYS CFD 2020 R2 se procede a evaluar la convergencia de la solución del proceso iterativo a través de gráficas, resultados de balances y contornos de las regiones de mayor interés. Se revisaron errores con respecto a la geometría, propiedades y constantes en el modelo. El resultado de la simulación se visualizó con respecto a los parámetros de velocidad, presión y tiempo.

### **3.5 Post-procesamiento**

Encontrar los rangos de velocidad y tiempo en la región de interés será el objetivo principal en el proceso. La validación de la simulación con respecto a las variables de entrada se compara con los datos experimentales o de literatura, en donde se observaron las diferencias y cambios que generan dichas variables. Con la respuesta obtenida se procede a aplicar criterios para mejorar la simulación del clarificador secundario. Generalmente los resultados se estudian mediante tabulaciones, contornos de colores y gráficas.

#### ***Figura 1.***

*Representación del diagrama metodológico, donde muestra las fases a desarrollar durante el estudio.*



## 4 Resultados

### 4.1. Sólido 3D.

La geometría del clarificador está conformada por 5 cuerpos: caracterizados por figuras sólidas cilíndricas y cónicas. Las dimensiones del clarificador secundario se basaron en la configuración propuesta por André & Robalino (2020), los cuales presentan la geometría simplificada. Cada una de las estructuras que hacen parte del equipo deben ser abordadas de manera independiente teniendo en cuenta las medidas de diseño dadas de la siguiente manera:

**Tabla 4.**

*Dimensiones de la geometría del clarificador secundario.*

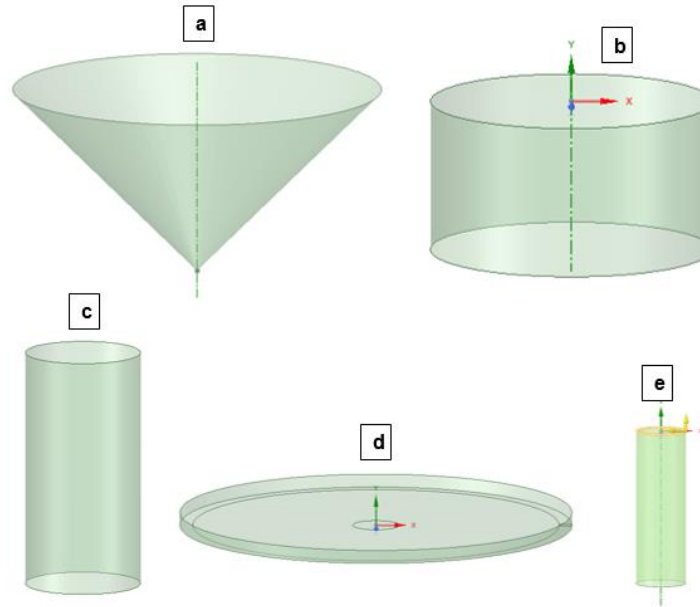
	Sólido	Dimensiones	
		Diámetro [m]	Altura [m]
<b>a</b>	Cono	2.8	1.4
<b>b</b>	Cilindro I	2.8	1.5
<b>c</b>	Cilindro II	0.36	1.5
<b>d</b>	Cilindro III	3	0.1
<b>e</b>	Cilindro IV	0.0508	0.2

Nota. Información tomada de André & Robalino, (2020)

Por medio de un boceto se desarrolló la geometría, donde la coordenada “y” representa la altura y las coordenadas “x” “z” representan el ancho del sistema de clarificación.

**Figura 2.**

Estructuras que conforman un clarificador secundario.

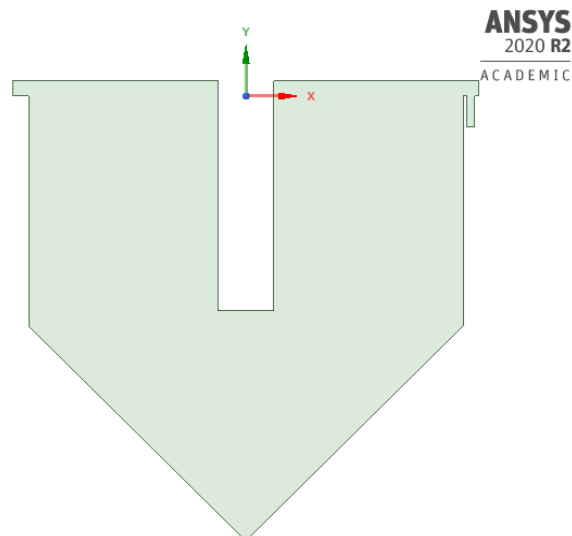


Estructura a) Decantador de sólidos del clarificador b) Tanque del clarificador c) Estructura rompe presión para la entrada el efluente del clarificador d) Rebosadero para salida de agua clarificada e) Tubería de salida del efluente clarificado

Para el desarrollo del sólido final, como principales se fusionaron los sólidos a, b, d, seguidamente se unieron c y e donde están contenidas la entrada y salida del efluente.

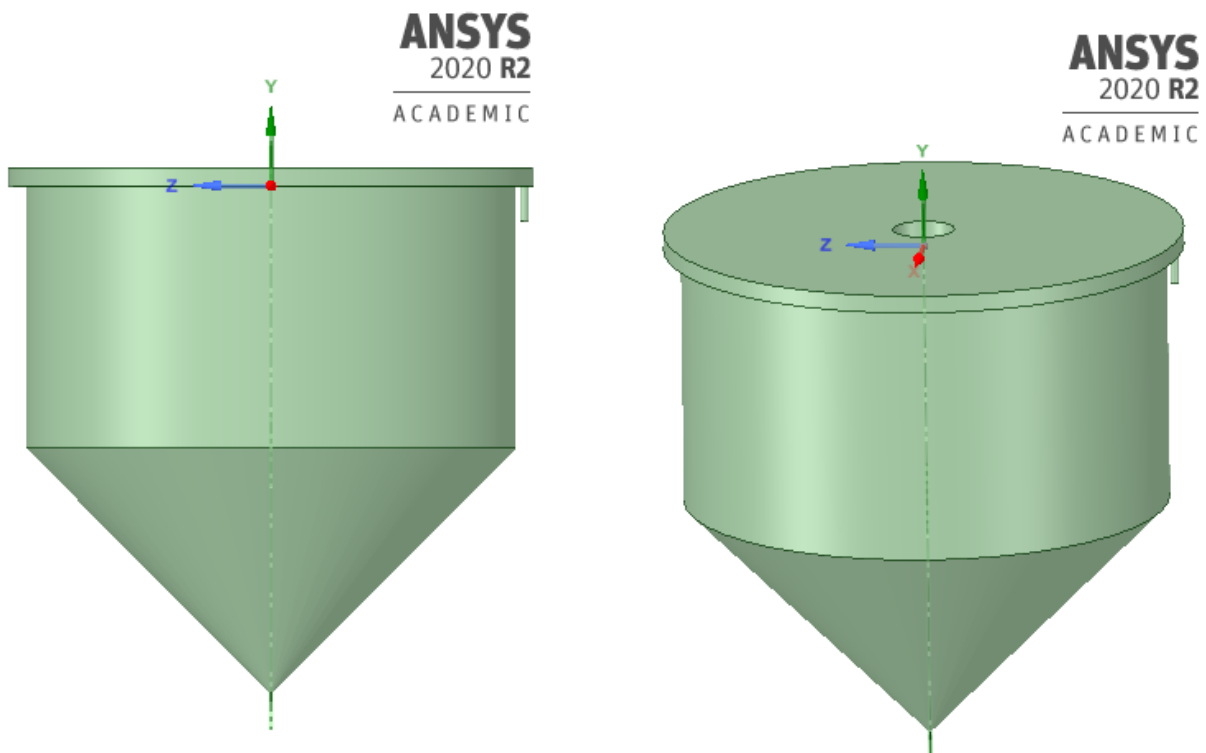
### Figura 3.

*Boceto en 2D del clarificador secundario.*



**Figura 4.**

Geometría final del clarificador secundario.



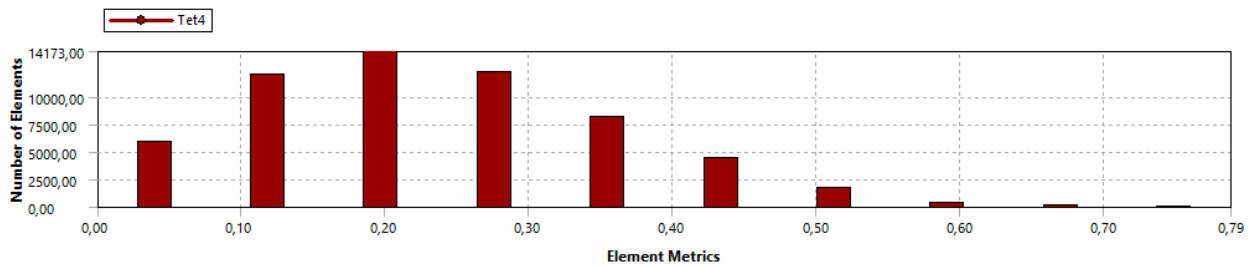
La estructura del clarificador secundario tiene medidas de 3 m de ancho y 3 m de altura en general.

#### 4.2. Malla computacional

Hay que destacar que Ansys-Meshing posee varios criterios en donde evalúa la malla. En la **Figura 5.** se muestra el criterio de evaluación de calidad de la malla por medio de la herramienta Skewness, mediante un histograma.

**Figura 5.**

*Histograma de calidad de malla en el sólido clarificador.*

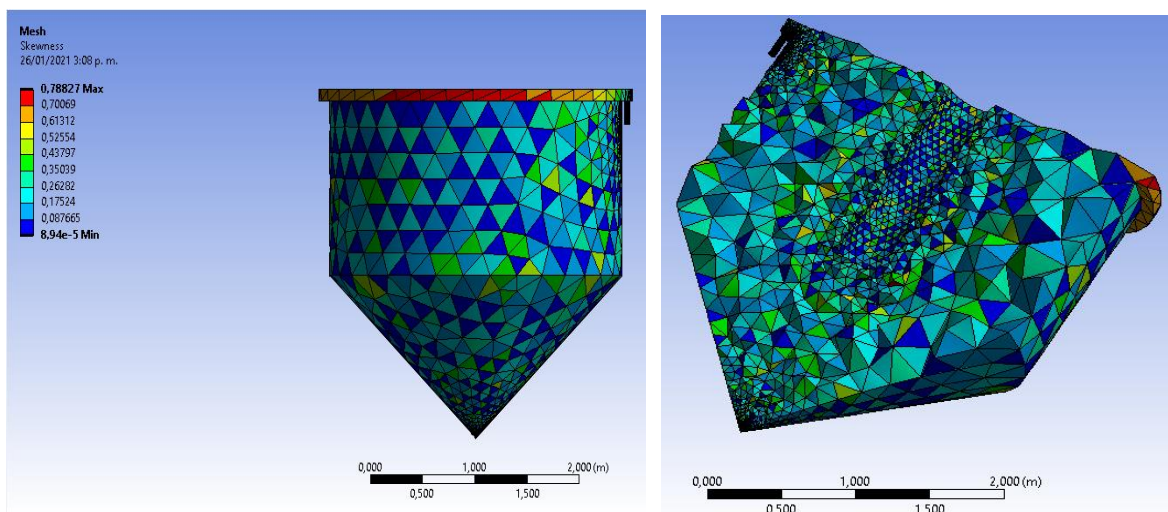


Los datos mostrados en el histograma muestran por medio de métrica de mallado el número de elementos generados en un valor de calidad de 0 a 1, en donde a mayor número de elementos mejor la calidad, para el caso de estudio se encontró que para una calidad de 0,2 según skinning se tienen aproximadamente 14173 elementos.

La evaluación del criterio de mallado también fue posible observarse mediante Display Style donde con un corte se observa el mallado en el interior del sólido.

**Figura 6.**

Evaluación de malla en el interior del sólido clarificador



Dentro del sistema de evaluación de la malla por medio de skewness se encuentran elementos con un mínimo de  $8,94 \times 10^{-5}$  y un máximo de de 0.78827.

#### 4.2.1 Refinamiento de la malla

Se realizó un ajuste y refinamiento de la malla, donde por medio de Mesh se insertó Method el cual se encargó de controlar el algoritmo y tipo de malla en todo el sólido con elementos tetraédricos en las paredes y un tamaño de elemento de 0.01 como se observa en la **Figura 7**. Las características con respecto al número de elementos, número de nodos son mostrados en la **Tabla 5**.

**Tabla 5.**

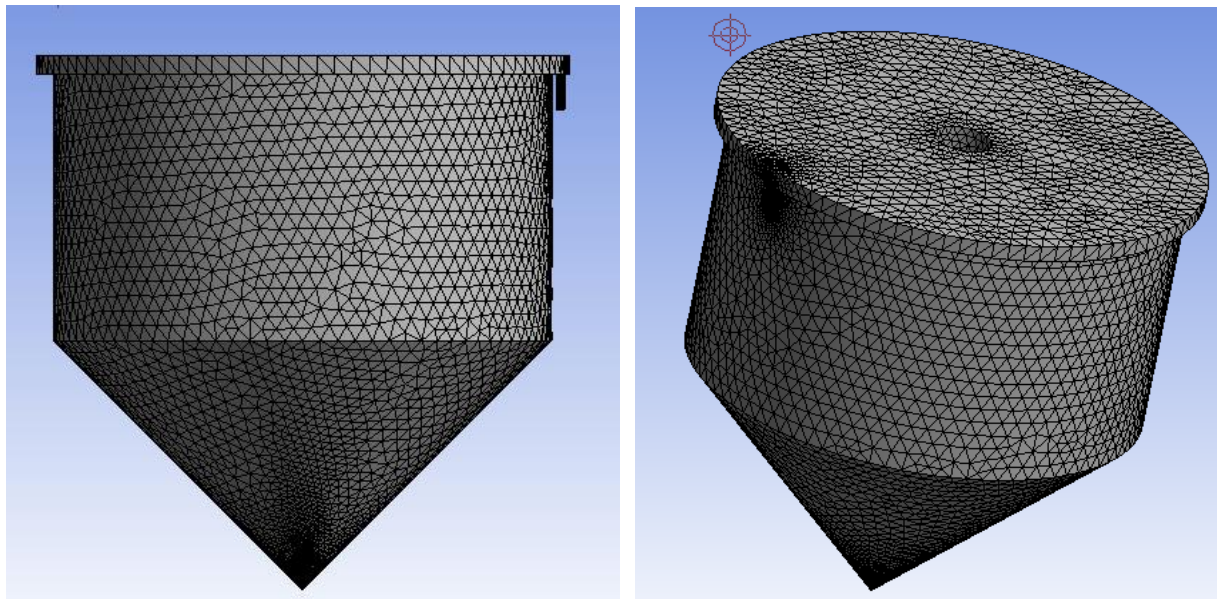
*Datos de la malla computacional*

Nodos	26009
Elementos	131526

Nota. Información tomada de Ansys Fluent Academic

**Figura 7.**

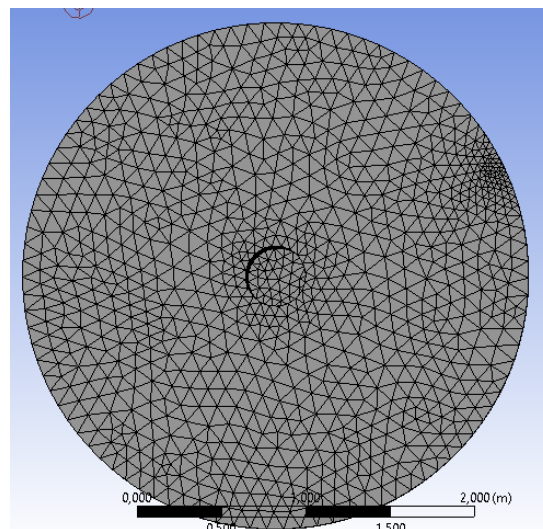
*Malla de las paredes "Walls".*



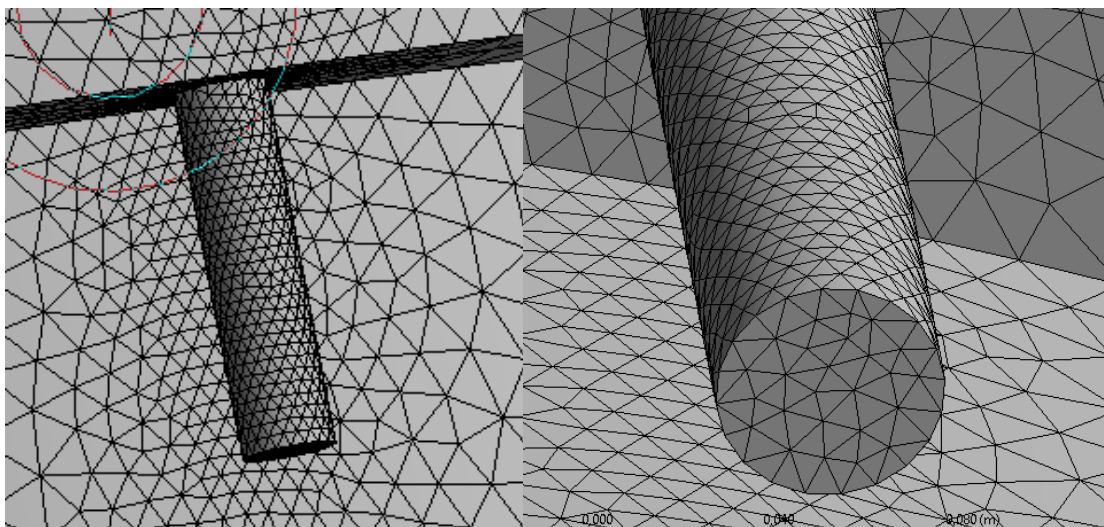
Teniendo en cuenta las regiones de interés que se tomaron en consideración para la generación de la malla se realiza un análisis de mallado dentro de estas en las cuales se encuentran entrada (Inlet) y salida (Outlet) se observar en la **Figura 8** y **Figura 9** respetivamente.

**Figura 8.**

*Malla de la superficie de entrada “Inlet”.*

**Figura 9.**

*Malla de la superficie de salida “Outlet”.*



### 4.3 Solución del sistema

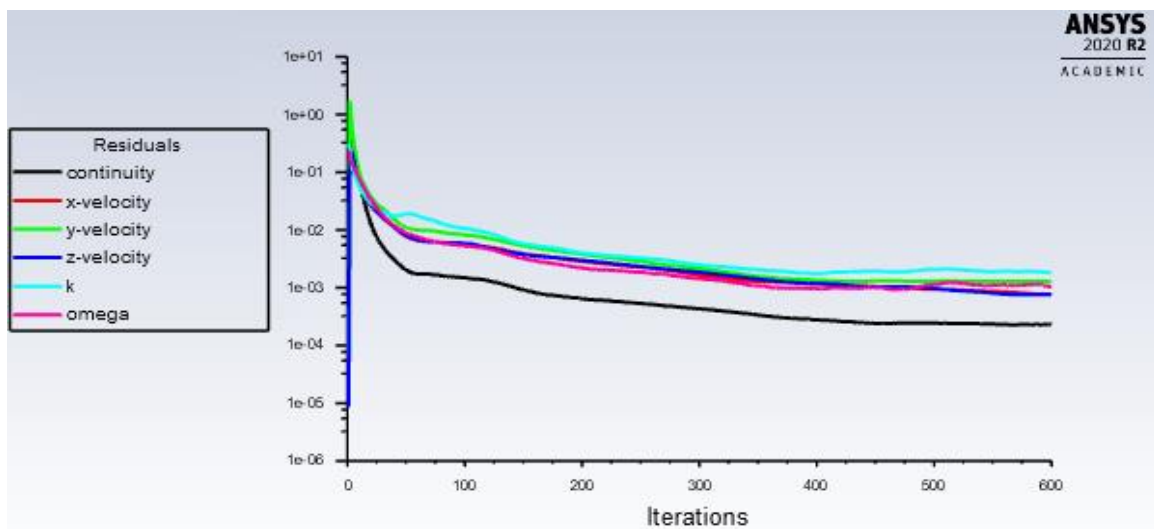
Para estudiar el comportamiento del clarificador secundario, se realizó la simulación con modelo turbulento y una duración de 300 s con pasos de 0.5, resolviendo así cada iteración. Para

lograr mejor reconocimiento del comportamiento del fluido en la unidad de sedimentación se muestran gráficos y contornos con respecto a la velocidad, tiempo, trayectoria, turbulencia y energía cinética en las principales zonas de interés como lo son entrada, salida y comportamiento dentro del sedimentador.

En primer lugar, se muestran los resultados encontrados en el software ANSYS-FLUENT, por medio de la gráfica residual, donde como se mencionó anteriormente tiene una duración de 300 s con pasos de 0.5, es decir se realizaron dos iteraciones por segundo dando en total un número iterativo de 600. Con dichas iteraciones se logró una convergencia con respecto a los componentes de continuidad, velocidad y cinética de turbulencia. En la **Figura 10**, se observa que las ecuaciones tienen tendencia a valores no mayores a 1 con tendencia a disminuir gradualmente. La gráfica también muestra una convergencia con respecto a las coordenadas de velocidad (x,y,z) en la iteración 450, que muestra una velocidad con tendencia lineal cercana a  $10^{-3}$ , dato similar a lo reportado en (André & Robalino, 2020).

**Figura 10.**

*Gráfica de residuales de la simulación del clarificador secundario.*

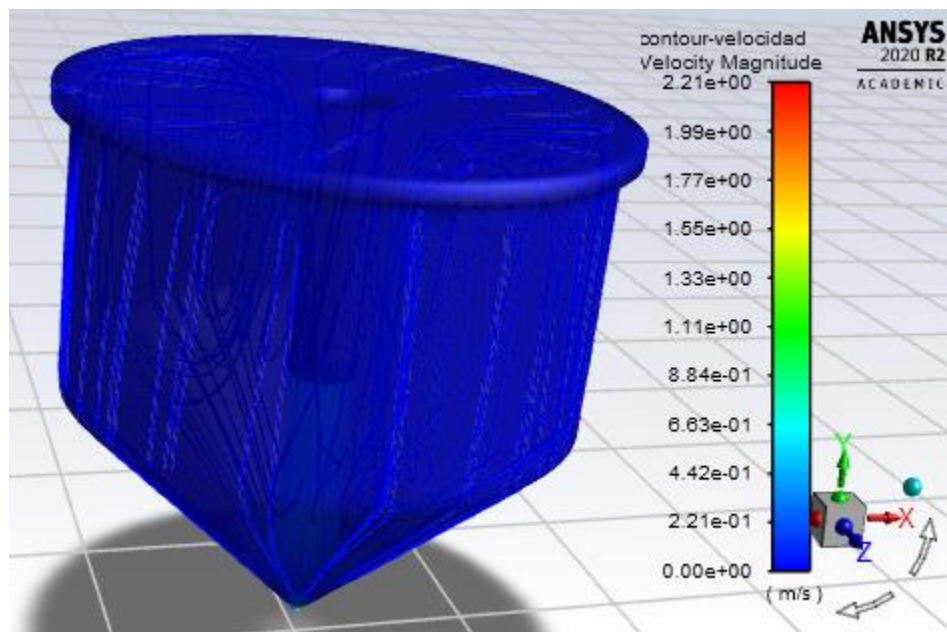


Dentro de la configuración del clarificador secundario se encuentra la entrada del fluido al sistema el cual tiene una coordenada “y” negativa, es decir que el flujo se dirige hacia dentro del sistema mediante una entrada vertical negativa, seguidamente a esto el fluido fluye en las demás coordenadas laterales, teniendo como límite el rebosadero. Donde finalmente el agua clarificada se dirige a la siguiente etapa y los sólidos sedimentados son retenidos en el fondo del clarificador, es decir al decantador de partículas.

El estudio se desarrolló con respecto al comportamiento de la magnitud de velocidad donde el resultado obtenido tiene un rango de velocidad de 0 – 2.21 m/s. Por consiguiente, para velocidades cercanas o iguales a cero, el proceso logra la sedimentación dentro de este; para velocidades cercanas 2.21 m/s, el agua tiene mayor turbulencia, generando menor posibilidad de sedimentación.

### Figura 11.

Contorno de la velocidad en las paredes del clarificador secundario.



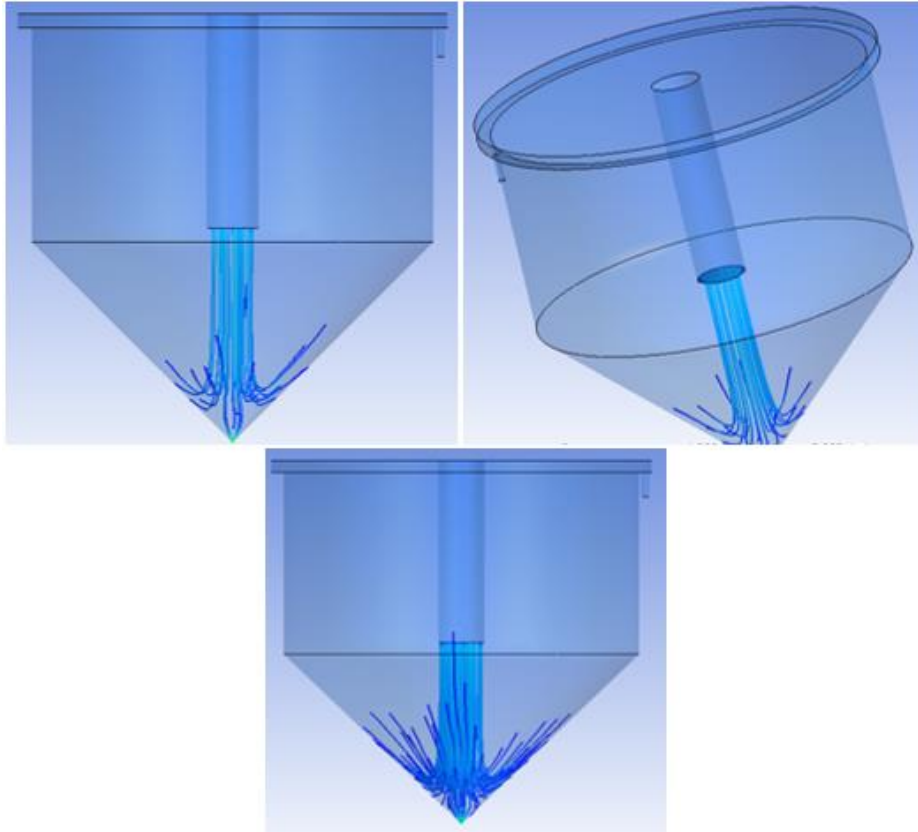
Mediante la dinámica de fluido computacional se puede evidenciar si es posible que se pueda realizar el proceso de sedimentación mediante el contorno de velocidad y distribución del

flujo, dentro del contorno se contempla que en el interior del clarificador las velocidades están en el rango de 0 a 2.21 m/s, en donde se evidencia que la velocidad del flujo tiene una tendencia a mantenerse en una velocidad de 0.663m/s, siendo una velocidad baja o cercana a cero, por lo tanto según la teoría se puede cumplir con el proceso de sedimentación en el fondo del tanque decantador.

Con respecto a cómo fluye el fluido en la dirección “y” dentro del clarificador se visualiza en la **Figura 12.** que la distribución de la corriente de velocidad al principio tiene una dirección “y” descendente hasta tocar el fondo del tanque donde en ese punto la velocidad disminuye y se dirige a las demás regiones, a medida que ingresa el flujo se logra una mejor integración del fluido y se tienen una dirección más homogénea.

**Figura 12.**

*Distribución del fluido dentro del clarificador secundario.*



## 5 Conclusiones

Con respecto a la generación de la malla computacional mediante Meshing se evidenció una generación de nodos de calidad respecto a la distribución de volúmenes tetraédricos por medio de Method lo más cercano a la realidad **Figura 6**, dando así un mallado de calidad considerados dentro del comportamiento fluido dinámico CFD.

Para garantizar el adecuado funcionamiento de la unidad de clarificación en la simulación se desarrolló mediante el algoritmo de SIMPLE, el cual por medio de la **Figura 10**. se observó que la solución dio como resultado una estabilidad del sistema en un tiempo determinado de 300 s alcanzando la convergencia del sistema lo que genera un estado estacionario a partir de la iteración 450 siendo un algoritmo satisfactorio en el desarrollo del estudio de la unidad de clarificación.

El análisis encontrado respecto a las variables consideradas en el estudio con CFD se logra observar el efecto que tiene el flujo del tanque sobre la sedimentación. Las condiciones tomadas a la entrada “inlet” del sistema representan un modelo de simulación correctamente con una velocidad de 0.4 m/s, lo que conlleva a una distribución coherentes dentro del sistema **Figura 12** y valores de velocidad dentro del rango **Figura 11** dentro del modelo tomado de clarificación.

Finalmente, la simulación CFD logra una estabilidad **Figura 10**, siendo una simulación de la unidad de clarificación que puede ser confiable por medio de ANSYS-FLUENT® Academic, ya que es una herramienta que optimiza el desempeño de sedimentación en clarificadores secundarios. Al mismo tiempo se pueden evidencia los alcances que se logran con las diferentes simplificaciones, métodos y sistemas logrando facilitar el modelo de simulación.

## **6 Recomendaciones**

Se recomienda realizar una construcción de la geometría del clarificador secundario por medio de otro programa distinto donde verifique y compare la estructura del clarificador secundario. El incluir la tubería del efluente por la parte inferior del sólido, llegando a la estructura rompe presión y así ingresar el clarificador para evidenciar los cambios que se pueden generar.

Con respecto a la verificación de la malla es considerable desarrollar un modelo de mallado en donde se consideren elementos hexaedros y tetraédricos que permitan mejor alineamiento y compatibilidad con los diferentes algoritmos presentes en las condiciones de mallado.

Realizar una simulación con Comportamiento Fluido Dinámico (CFD) teniendo en cuenta las diferentes densidades y tipos de sólidos sedimentados que se pueden encontrar dentro de las aguas a tratar en los tratamientos de sedimentación por medio de clarificadores secundarios.

### Referencias Bibliográficas

- André, M. y Robalino, V. (2020). Simulación mediante dinámica de fluidos computacional (CFD) del efluente en el clarificador secundario de la PTAR UDLAPARK. Facultad de Ingeniería y Ciencias Aplicadas.
- Berrío, J. C., & Ratkovich, N. R. (2014). Simulación en CFD de un tanque de sedimentación secundaria con la implementación de un Modelo de Balance Poblacional (PBM).
- Díaz, A., Chingaté, N., Muñoz, D., Olaya, W., Perilla, C., Sánchez, F., y Sánchez, K. (2009). Desarrollo sostenible y el agua como derecho en Colombia. Universidad Javeriana. Bogotá D.C. Colombia.
- EquipeSSS, (2016). ESSI: Dinámica de fluidos computacional o CFD: Entienda que es. <https://www.esss.co/es/blog/dinamica-de-fluidos-computacional-que-es/>
- Fibras y Normas de Colombia, S. A. S. (2018). Estas son las etapas del tratamiento de aguas residuales. <https://blog.fibrasynormasdecolombia.com/etapas-del-proceso-tratamiento-aguas-residuales/>
- Ingeniería de Tratamiento de Aguas Residuales. Tratamiento fisicoquímico y biológico de aguas residuales. <http://www.oocities.org/edrochac/residuales/tratamientobiologico4.pdf>
- León Gómez, P. (1744). Disertaciones morales y médicas. Spain: en la Imprenta y Librería de Manuel Fernández, 1744. <https://hdl.handle.net/2027/ucm.5329210341>.

LOPEZ REBOLLAR, B. M. (2015). Aplicación de CFD-ansys-fluent en el estudio hidrodinámico de tanques de recirculación empleados en acuicultura.

Macías Hernández, J, (2015). La simulación de procesos en la industria química: ¿espectador o protagonista del cambio? *Industria Química*.  
<https://www.industriaquimica.es/articulos/20150504/simulacion-procesos-industria-quimica-espectador-protagonista-cambio>.

Yactayo, I. .V. M. (n.d). Sedimentación. Cap 7. (pp65).

Ordoñez, A. (2015). Evaluación de un sedimentador de alta tasa con un modelo de dinámica de fluidos computacional (DFC) (Tesis de posgrado). Universidad Nacional Autónoma de México.

Raghuvanshi, S., Bhakar, V., Sowmya, C., & Sangwan, K. S. (2017). Waste water treatment plant life cycle assessment: Treatment process to reuse of water. *Procedia CIRP*, 61, 761-766.

SERECO. (2012). Sedimentadores circulares. <http://www.sereco.it/>.

*Tanques clarificadores* (2016). <https://www.slideshare.net/andrescudriz/tanques-clarificadores>.

Tamburrino, A. (2010). Introducción a la teoría de los flujos bifásicos solido-liquido. *Universidad De Chile*. [https://www.u-cursos.cl/ingenieria/2010/2/CI61N/1/material\\_docente/](https://www.u-cursos.cl/ingenieria/2010/2/CI61N/1/material_docente/).