



ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL



FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA

**TEMA: OPTIMIZACIÓN DE LA EFICIENCIA DE TANQUES DE
TRATAMIENTO DE AGUA DE PRODUCCIÓN MEDIANTE
SIMULACIÓN CFD**

**TRABAJO DE TITULACIÓN PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE
MAGISTER EN DISEÑO Y SIMULACIÓN**

Ing. Fabrizio Paúl Rodríguez Sierra
fabrizio_rodriguez@outlook.com

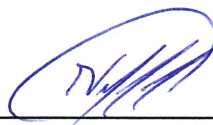
DIRECTOR: Ing. Victor Hugo Hidalgo Diaz DSc
victor.hidalgo@epn.edu.ec

CODIRECTOR: Ing. Edgar Hernán Cando Narvaez PhD
edgar.cando@epn.edu.ec

MARZO 2023

CERTIFICACIÓN

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por **FABRIZIO ÁUL RODRÍGUEZ SIERRA**, bajo mi supervisión.



Ing. Victor Hugo Hidalgo Diaz DSc

DIRECTOR DEL PROYECTO



Ing. Edgar Hernán Cando Narvaez PhD

CODIRECTOR DEL PROYECTO

DECLARACIÓN

Yo, **Fabrizio Paúl Rodríguez Sierra**, declaro bajo juramento que el trabajo aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

A través de la presente declaración cedo mis derechos de propiedad intelectual correspondiente a este trabajo, a la Escuela Politécnica Nacional, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su Reglamento y por la normativa institucional vigente.



Ing. Fabrizio Paúl Rodríguez Sierra

DEDICATORIA

A mi familia, mis padres Héctor y Rosita y mi hermano Edison quienes con su esfuerzo y apoyo siempre han estado junto a mí.

Fabrizio R.

AGRADECIMIENTO

A la empresa Gente Oil Ecuador y a sus excelentes profesionales, quienes me han dado la oportunidad de desarrollarme personal y profesionalmente; y gentilmente haber realizado el auspicio de este programa de maestría.

Fabrizio R.

ÍNDICE GENERAL

CERTIFICACIÓN	I
DECLARACIÓN	II
DEDICATORIA	III
AGRADECIMIENTO	IV
ÍNDICE GENERAL	V
ÍNDICE DE TABLAS	VII
ÍNDICE DE FIGURAS	VIII
RESUMEN	IX
ABSTRACT	X
INTRODUCCIÓN	1
1. MARCO TEÓRICO	3
1.1. TANQUE DESNATADOR	3
1.2. Fenómenos físicos	4
Separación gravitacional	4
Dispersión de partículas	5
Coalescencia	5
1.3. Estado del arte	6
1.4. Dinámica de fluidos computacional (CFD)	8
Ecuaciones de Gobierno	8
Euleriano-Euleriano	9
Euleriano- Lagrangiano	9
Modelamiento Turbulento	12
Discretización	14
1.5. Software ANSYS Fluent	16
Flujo de trabajo en Fluent	16
2. METODOLOGÍA	18
2.1 Preprocesamiento	18
Geometría del dominio	18
Malla computacional	22
2.2 Procesamiento	24
Condiciones de operación	24
Condiciones de borde	25
Discretización y solución numérica	26
2.3 Post procesamiento	30
Independencia de malla	30
Calidad de la malla	31
Residuales de simulación	32
3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	33
3.1 Modelo de tanque actual	33
Validación de resultados	33
Tiempo de retención del tanque actual	34
Patrones de flujo del tanque actual	36
Eficiencia de separación del tanque actual	39

3.2	Modelo de tanque propuesto.....	40
	Resultados del modelo propuesto.....	43
	CONCLUSIONES.....	48
	REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS.....	50
	ANEXOS.....	51
	Anexo 1: Plano General Tanque T-400C (Gente Oil Ecuador Pte. Ltd, 2021).....	51
	Anexo 2: Seguimiento diario de control de fluidos (Gente Oil Ecuador Pte. Ltd, 2021) 52	
	Anexo 3: Validación de modelo Caso validación	53
	Anexo 4: Tiempo de residencia de partículas (Caso - Validación).....	54
	Anexo 5: Validación de modelo Tanque propuesto	57
	Anexo 4: Tiempo de residencia de partículas (Tanque propuesto).....	58

ÍNDICE DE TABLAS.

Tabla 1-1 Parámetros de dispersión para diferentes estados de inyección.....	11
Tabla 2-1 Dimensiones y ubicaciones de boquillas e internos (Gente Oil Ecuador Pte. Ltd, 2021)	19
Tabla 2-2 Condiciones de operación Tanque actual (Gente Oil Ecuador Pte. Ltd, 2021) 	24
Tabla 2-3 Propiedades de flujos (Gente Oil Ecuador Pte. Ltd, 2021)	25
Tabla 2-4 Condiciones de contorno	26
Tabla 2-5 Independencia de malla.....	30
Tabla 2-6 Parámetros de calidad de malla Tanque actual.....	31
Tabla 3-1 Comparación de resultados (Laboratorio vs Simulación)	34
Tabla 3-2 Tiempos de retención de partículas simulado	35
Tabla 3-3 Eficiencia de separación de simulación	39
Tabla 3-4 Parámetros de calidad de malla de tanque propuesto	42

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1-1 Esquema de un tanque desnatador (Arnold & Stewart, 2008).....	4
Figura 1-3 Velocidad bajo régimen turbulento (Versteeg & Malalasekera, 2007)	12
Figura 1-7 Malla estructurada (Sayma, 2009).....	16
Figura 1-8 Malla no estructurada (Sayma, 2009).....	16
Figura 2-1 Metodología Simulación CFD.....	18
Figura 2-2 Tanque T-400C (Gente Oil Ecuador Pte. Ltd, 2021).....	20
Figura 2-3 Geometría 3D (Vista Isométrica) Tanque actual	21
Figura 2-4 Extracción de volumen interno Tanque actual.....	21
Figura 2-5 Malla de Tanque T-400C.....	22
Figura 2-6 Refinamiento de malla	22
Figura 2-7 Punto de evaluación de independencia de malla	23
Figura 2-8 Configuración de Modelo de Fase Discreta (DPM)	28
Figura 2-9 Independencia de malla (velocidad).....	31
Figura 2-10 Calidad de elementos de malla Tanque actual.....	31
Figura 2-11 Residuales de la simulación numérica	32
Figura 3-1 Estabilización de la simulación Tanque actual	34
Figura 3-2 Vista Isométrica trayecto de partículas de petróleo.....	36
Figura 3-3 Vista Y-Z trayecto de partículas de petróleo.....	36
Figura 3-4 Vista Isométrica de líneas de flujo de velocidad.....	37
Figura 3-5 Vista Y-Z de líneas de flujo de velocidad.....	37
Figura 3-6 Vista X-Y Contorno de velocidad (inlet).....	38
Figura 3-7 Vista Y-Z Contorno de velocidad (outlet).....	38
Figura 3-8 Vista Z-X Contorno de velocidad (Inlet – Outlet)	39
Figura 3-9 Difusor de ingreso de fluido propuesto	40
Figura 3-10 Colector de descarga de fluido propuesto.....	41
Figura 3-11 Geometría de tanque propuesto	41
Figura 3-12 Malla de tanque propuesto.....	42
Figura 3-13 Calidad de elementos de malla de tanque propuesto	42
Figura 3-14 Residuales de simulación Tanque propuesto.....	43
Figura 3-15 Estabilización de estabilización Tanque propuesto	43
Figura 3-16 Vista Y-Z trayecto de partículas de petróleo Tanque propuesto	44
Figura 3-17 Vista de planta trayecto de partículas de petróleo Tanque propuesto.....	45
Figura 3-18 Vista Y-Z líneas de flujo de velocidad Tanque propuesto	45
Figura 3-19 Vista de planta líneas de flujo de velocidad Tanque propuesto	46
Figura 3-20 Vista Y-Z Contorno de velocidad (inlet y outlet).....	46
Figura 3-21 Vista de planta Contorno de velocidad (inlet).....	47

RESUMEN

En la industria petrolera, el contenido de petróleo en agua (OIW) es un factor crítico de control de pérdidas de hidrocarburos y un indicador para evitar obstrucciones en equipos de tratamiento y formaciones receptoras. Hoy en día a través de la Dinámica de Fluidos Computacional (CFD) se puede evaluar el proceso de separación de fases y optimizar el diseño de equipos para maximizar la eficiencia de separación.

En el presente estudio se ha desarrollado una simulación CFD multifásica de un tanque skimmer (desnatador) a través de la licencia académica del software comercial de CFD ANSYS FLUENT, en el cual se replicó las condiciones en el interior del tanque y se validó con la información obtenida del control de OIW realizado por la empresa operadora.

El fenómeno multifásico del flujo de agua y la fracción de petróleo arrastrada al interior del tanque fue simulado por el enfoque eulerian - lagrangian a través del modelo Discrete Phase Model (DPM) en estado transitorio con el modelo de turbulencia RANS ($k-\epsilon$) en un dominio tridimensional de acuerdo al diseño y dimensiones del tanque.

Una vez validado el modelo se simuló nuevos casos con variaciones en los internos: propagadores en el flujo de entrada y colector para la descarga del tanque, lográndose disminuir la concentración de crudo en la descarga de 146,5 ppm a 83,64 ppm e incrementar la eficiencia de separación de 70,95% a 81,11%.

Palabras clave: CFD, Desnatador, DPM, FLUENT, Simulación Numérica.

ABSTRACT

In the oil and gas industry, the content of oil in water (OIW) is a critical factor in controlling hydrocarbon losses and an indicator to avoid blockages in treatment equipment and receiving formations. Today, through Computational Fluid Dynamics (CFD) is possible to evaluate the phase separation process and optimize the equipment design to maximize separation efficiency.

In the present study, a CFD multiphase simulation of a skimmer tank has been developed through the academic license of the commercial CFD software ANSYS FLUENT. The conditions inside a skimming tank were replicated and validated with the OIW control carried out by the tank operator company Gente Oil Ecuador Pte Ltd.

The multiphase phenomenon of the water flow and the oil fraction dragged into the tank was simulated by the eulerian-lagrangian approach through the Discrete Phase Model (DPM) in a transient state. The project was developed with the RANS turbulence model ($k-\epsilon$) in a three-dimensional domain according to the design and dimensions of the tank.

Once the model was validated, new cases were simulated with internal variations: propagators in the inlet flow and collector for the tank discharge, managing to reduce the concentration of crude oil in the discharge from 146,5 ppm to 83,64 ppm and increase the separation efficiency from 70,95% to 81,11%

Keywords: CFD, DPM, FLUENT, Numerical Simulation, Skimmer.

OPTIMIZACIÓN DE LA EFICIENCIA DE TANQUES DE TRATAMIENTO DE AGUA DE PRODUCCIÓN MEDIANTE SIMULACIÓN CFD

INTRODUCCIÓN

La mayoría de los campos petroleros ecuatorianos operan sobre yacimientos maduros y con mecanismos de producción de empuje hidráulico, razón por la cual actualmente sufren un exponencial incremento del corte de agua, en promedio mayor a 84,6% de BSW en los campos operados por la estatal PETROECUADOR EP. Esta situación pone una enorme presión sobre la industria hidrocarburífera para gestionar de forma eficiente esta creciente cantidad de agua de producción a la par de reducir los costos de las actividades de desarrollo, ingeniería y operaciones ligadas al tratamiento de este fluido.

La alternativa de disposición más común para el agua de formación es la reinyección en formaciones porosas del subsuelo, pero para encontrarse en condiciones de reinyección, el agua separada del petróleo requiere ser tratada y los tanques de desnatado generalmente constituyen la primera etapa de tratamiento (Arnold & Stewart, 2008).

Debido al paso del tiempo, en conjunto con los factores antes indicados y la necesidad de incrementar la producción, las facilidades de producción y tratamiento de agua como los tanques desnatadores disminuyen su eficiencia, ya que son dimensionados de acuerdo con el flujo volumétrico inicial, provocando que queden sub dimensionados para las nuevas condiciones de operación.

En este sentido la optimización de la eficiencia de los equipos de tratamiento de agua se ha vuelto un factor clave para lograr los objetivos de garantizar la rentabilidad y cumplir con los requisitos técnicos y reglamentarios para una disposición adecuada del agua de producción.

La función de los tanques desnatadores se resumen en separar las partículas de aceite que están sujetas a varios fenómenos físicos durante su recorrido desde los pozos productores hasta los equipos procesadores en superficie mediante la aplicación de un estado de energía baja donde se produzca una adecuada combinación de separación gravitacional, coalescencia y dispersión de las partículas (Arnold & Stewart, 2008).

En los últimos años ha existido un importante avance en la capacidad de procesamiento computacional, lo que ha permitido aplicar la dinámica de fluidos computacional (CFD) para el análisis de flujos a través de esta técnica de simulación que se basa en la resolución de las ecuaciones de Navier-Stokes y ofrece a los ingenieros y científicos la capacidad de predecir flujos de fluidos, calor, transferencia y otros fenómenos como el flujo multifásico, que por su naturaleza no es fácil de predecir tanto en la realidad como por métodos analíticos (McCleney, Green, & Owston, 2015).

En este proyecto se plantea la aplicación de CFD en el software ANSYS FLUENT con el modelo eulerian - lagrangian para optimizar el diseño de los tanques desnatadores mediante el modelamiento del flujo multifásico en su interior con datos de ingeniería e información del proceso de tanques de tratamiento de agua de la empresa Gente Oil Ecuador, quien es el operador del Bloque 53 – Campo Singue.

Objetivo general

Optimizar la eficiencia de separación de los tanques de tratamiento de agua de producción en la industria petrolera ecuatoriana mediante simulación CFD.

Objetivos específicos

- Realizar una geometría 3D para un tanque de 500 barriles.
- Desarrollar un mallado para aplicación de CFD en el tanque de tratamiento de agua con análisis de independencia de malla.
- Simular mediante software de CFD el principio de separación para este tipo de tanques.
- Validar los resultados con el comportamiento del tanque a las condiciones de internos actuales.
- Optimizar el diseño de internos para una mejor separación de fluidos mediante simulaciones CFD

1. MARCO TEÓRICO

1.1. TANQUE DESNATADOR

El equipo de tratamiento primario de agua de producción es un desnatador que puede ser un recipiente a presión o tanque atmosférico diseñado para proporcionar un tiempo de residencia durante el cual pueda ocurrir la coalescencia y separación gravitacional (Arnold & Stewart, 2008).

Durante el diseño y operación de desnatadores es primordial tomar en cuenta los efectos de vibración, turbulencia y corto circuitos. Los desnatadores pueden poseer propagadores o difusores en la entrada y colectores en la salida para ayudar a lograr una distribución de flujo uniforme. El flujo entra y pasa a través de un tubo que lo dirige a través de las capas de aceite y agua hasta un propagador que permita que el agua continúe su flujo con una velocidad uniforme sobre toda la sección transversal en el recipiente hasta llegar al colector de descarga. En esta zona tranquila entre el propagador y colector de agua, puede ocurrir coalescencia y boyanza de las partículas de petróleo, permitiendo que estas asciendan contra el flujo de agua y se acumulen en la superficie del fluido para posteriormente ser retiradas (Arnold & Stewart, 2008).

Los desnatadores al constituir la primera etapa de tratamiento deben proveer un tiempo de residencia entre 10 y 30 minutos para asegurar coalescencia de las partículas y pueden requerir baffles para distribución de flujo y eliminación de cortocircuitos debido a diferencias de densidades, temperatura, depositación de sólidos, etc. El rango de concentración de petróleo en la entrada de los desnatadores puede ir desde 500 a 10000 ppm de acuerdo a la eficiencia de los equipos de deshidratación de crudo disponibles en la planta de producción (Arnold & Stewart, 2008).

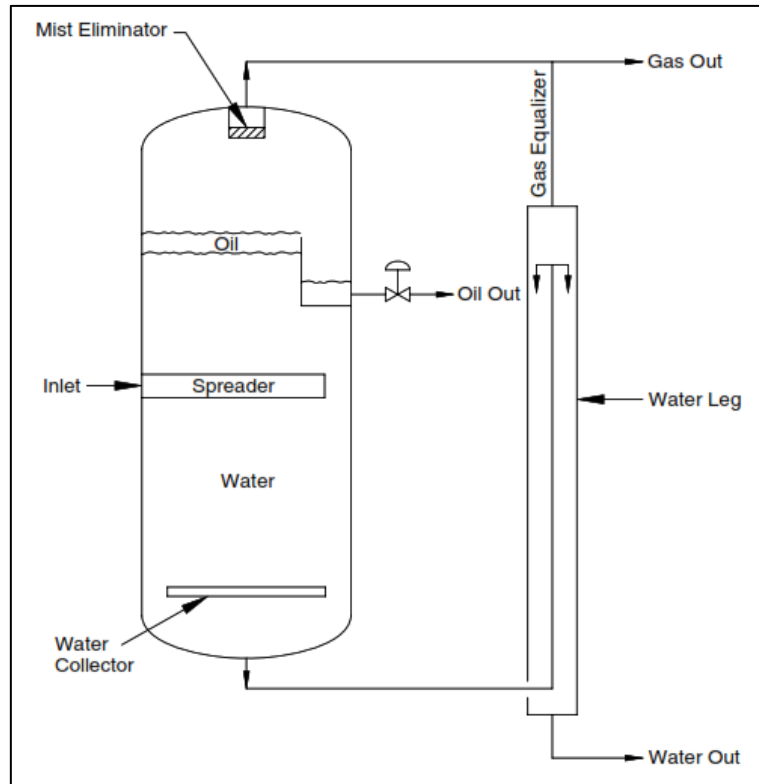


Figura 1-1 Esquema de un tanque desnatador (Arnold & Stewart, 2008)

1.2. Fenómenos físicos

Los fenómenos físicos que se producen en el interior de los desnatadores para separar las partículas de aceite de la fase continua (agua) son los siguientes:

Separación gravitacional

Las partículas de aceite generalmente son más livianas que el volumen de agua que las está desplazando y ejerciendo sobre ellas una fuerza de boyanza. A este movimiento ascendente se opone la fuerza de fricción debida a la fase continua, cuando las dos fuerzas se igualan, se logra una velocidad constante, calculada por la ley de Stokes (Arnold & Stewart, 2008).

$$V_o = 1.78 \times 10^{-6} (\Delta SG) (d_m^2) / \mu_w$$

Donde, V_o es la velocidad vertical relativa de las partículas de aceite respecto a la fase continua, d_m es el diámetro de las partículas de aceite, ΔSG es la diferencia de gravedad específica entre agua y aceite y μ_w es la viscosidad de la fase continua agua.

Deduciéndose:

- Cuanto más grandes son las partículas de aceite, se requiere menos tiempo para el ascenso y separación de las fases.
- Entre mayor sea la diferencia de densidades de las fases, mayor será la facilidad de su separación.
- A mayor temperatura se facilita el tratamiento del agua debido a la reducción de su viscosidad.

Dispersión de partículas

Se refiere al proceso de una fase discontinua (petróleo) que se divide en pequeñas partículas y se distribuye en la fase continua (agua) debido a una gran cantidad de energía cinética que provoca la oscilación de las partículas de petróleo, estas se vuelven inestables y se dispersan debido a la diferencia de tensión superficial entre una sola partícula y dos partículas que se han agrupado rompiéndose en partículas de menor tamaño (Arnold & Stewart, 2008).

Coalescencia

El movimiento de partículas pequeñas que al colisionar vencen la tensión interfacial y forman gotas de mayor volumen y estabilidad se denomina coalescencia. Este proceso en tratadores de agua depende fundamentalmente del tiempo de residencia en los recipientes debido a que, en la dispersión de dos líquidos inmiscibles, la coalescencia no ocurre inmediatamente con la colisión de las partículas, ya que, al estar expuestas a cambios de presión y turbulencia, la energía cinética de oscilación inducida en las partículas fusionadas es mayor que la energía de adhesión entre estas por lo que el contacto se rompe antes de completar la coalescencia. En el caso contrario si no existe la suficiente cantidad de energía, la frecuencia de colisión de las partículas será baja provocando una velocidad de coalescencia igualmente pequeña (Arnold & Stewart, 2008).

1.3. Estado del arte

Desde el inicio del estudio de los equipos de separación en la industria hidrocarburífera y hasta el día de hoy, el método para su diseño y dimensionamiento se basa en el tiempo de residencia. En general se obtiene el tiempo en que el volumen del fluido se mantiene en el interior del separador mediante la división del volumen del tanque para el caudal total del fluido, determinándose a partir de este resultado una aproximación de la eficiencia de separación del equipo deducido de la experiencia en estos procesos y análisis de laboratorio a escala (Arnold & Stewart, 2008).

El método basado en el tiempo de residencia puede ser considerado como un enfoque semi empírico que proporciona pautas útiles para el dimensionamiento de equipos separadores, pero que no siempre considera datos esenciales que afectan su rendimiento. Por ejemplo, existen aspectos importantes que no son considerados como los efectos de recirculación de fluidos, turbulencia y la distribución de diámetros de la fase secundaria ya que utiliza un solo tamaño de partícula representativo (Ghaffarkhah, Ameri Shahrabi, & Keshavarz Moraveji, 2018).

Estas suposiciones, simplificadas y restricciones del enfoque crean la necesidad de un método más completo que permita determinar las dimensiones y diseño apropiado de los equipos de separación. Ante esta situación, la Dinámica de Fluidos Computacional puede aplicarse para diseñar y optimizar las instalaciones de separación utilizadas en la industria hidrocarburífera.

Anteriormente, los estudios numéricos de CFD utilizaban principalmente el método Euleriano-Euleriano con el consecuente alto costo computacional y dificultades de allí derivadas. (Lee & Frankiewicz, 2005) aplicaron un modelo Volume Of Fluids (VOF) en la primera etapa del estudio para determinar la distribución de fases en el recipiente. Luego usaron el modelo Single-Phase Steady-State (solo con la fase agua) para determinar el régimen de flujo en el interior del tanque e inyectar partículas en el ingreso para visualizar su movimiento a lo largo del perfil de flujo.

(Vilagines & Akhras, 2010) evaluaron los efectos de nuevos componentes internos sobre la eficiencia de un separador trifásico. En ese estudio, utilizaron el modelo de turbulencia de transporte de esfuerzo cortante y el modelo Euleriano trifásico para simular el flujo multifásico.

(Kharoua & Khezzar, Application of CFD to Debottleneck Production Separators in a Major Oil, 2012) utilizaron un modelo CFD para modificar un separador de producción con el enfoque multifásico Euleriano-Euleriano y el conocido modelo de turbulencia $k - \varepsilon$. (Kharoua & Khezzar, Using CFD to Model the Performance of Retrofit Production Separators in Abu Dhabi, 2012) analizaron el rendimiento del flujo multifásico interno en un separador trifásico, para modelar fenómenos complejos como la distribución de tamaños, la coalescencia y la dispersión, utilizaron el modelo de balance de población (PBM). PBM es un modelo matemático complejo que describe el comportamiento de poblaciones de partículas incluyendo la nucleación, aglomeración, rotura, coalescencia y eventuales aumentos o disminuciones de partículas.

Otras publicaciones se enfocan en el modelo Euleriano-Lagrangiano, utilizaron una combinación de los modelos VOF y DPM para simular el flujo multifásico en separadores bifásicos en conjunto con el modelo de turbulencia $k - \varepsilon$ aportando sencillez y buena precisión. La eficiencia de los separadores se evaluó mediante la cantidad calculada de partículas en las salidas de los separadores.

(Pourahmadi & Svrcek, 2012) utilizaron DPM, VOF y $k - \varepsilon$ como modelo de turbulencia para desarrollar una simulación CFD realista para eliminar las restricciones en un separador trifásico. En ese estudio, la eficiencia de la separación trifásica se determinó utilizando la distribución de masa de partículas entre las salidas de gas, petróleo y agua.

(Ghaffarkhah, Ameri Shahrabi, & Keshavarz Moraveji, 2018) utilizaron un modelo CFD integral para investigar las características macroscópicas y microscópicas de los fenómenos de separación de tres fases. El microscópico proporciona un medio para describir las propiedades de las partículas de líquido que se inyectan en la entrada del separador. Por otro lado, el macroscópico proporciona un marco para describir las propiedades del sistema como un todo y determinar los perfiles de flujo de los flujos inmiscibles.

En este estudio, se combinaron dos modelos multifásicos (VOF y DPM) con el modelo de turbulencia $k - \varepsilon$. El modelo Discrete Random Walk (DRW) también se implementó para incluir los efectos del movimiento arbitrario de partículas debido a las variaciones causadas por la turbulencia. Con el modelo VOF crearon el fondo del dominio computacional, las superficies libres y las interfaces. Luego, a partir de estos resultados, con DPM determinaron

el rendimiento de la separación con la distribución de masa de partículas de líquido entre las salidas de gas, condensado y agua.

1.4. Dinámica de fluidos computacional (CFD)

CFD es el conjunto de conocimientos y herramientas mediante los cuales se resuelven los modelos matemáticos que gobiernan el flujo de fluidos utilizando un software informático. Es importante tener en cuenta que por la naturaleza del método aun utilizando computadores de altas prestaciones sólo se consiguen soluciones aproximadas (Zamora, 2016).

Ecuaciones de Gobierno

Las ecuaciones que gobiernan la dinámica de fluidos computacional se derivan de las leyes de la conservación de la física (Fernandez Oro, 2012)

Conservación de masa (ecuación de continuidad): Establece de forma general que el incremento de masa en el interior de un elemento fluido es consecuencia del flujo neto de masa hacia dicho elemento.

$$-\frac{\partial \rho}{\partial t} = \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z}$$

Conservación del momento (ecuaciones de Navier Stokes): La tasa de cambio del momento es igual a la suma de las fuerzas sobre una partícula fluida:

$$\begin{aligned} \rho \left(\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} \right) &= -\frac{\partial p}{\partial x} + \mu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) + F_x \\ \rho \left(\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} \right) &= -\frac{\partial p}{\partial y} + \mu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) + F_y \\ \rho \left(\frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} \right) &= -\frac{\partial p}{\partial z} + \mu \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) + F_z \end{aligned}$$

Conservación de la energía: La tasa de cambio de energía es igual a la suma de la tasa de adición de calor y la tasa de trabajo realizado sobre una partícula fluida:

$$\frac{\partial(\rho h)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{V} h) = \nabla \cdot \left(\frac{k}{C_p} \nabla h \right) + S_h$$

$$\begin{aligned} & \rho C_p \left(\frac{\partial T}{\partial t} + u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} + w \frac{\partial T}{\partial z} \right) \\ & = \Phi + \frac{\partial}{\partial x} \left[k \frac{\partial T}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[k \frac{\partial T}{\partial y} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[k \frac{\partial T}{\partial z} \right] + \left(u \frac{\partial p}{\partial x} + v \frac{\partial p}{\partial y} + w \frac{\partial p}{\partial z} \right) \end{aligned}$$

Donde la función de disipación es:

$$\begin{aligned} \Phi = 2\mu & \left[\left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial w}{\partial z} \right)^2 + 0,5 \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right)^2 + 0,5 \left(\frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \right)^2 + 0,5 \left(\frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z} \right)^2 \right] \\ & - \frac{2}{3} \mu \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} \right)^2 \end{aligned}$$

En las ecuaciones anteriores, u, v, w son las componentes de velocidad en x, y, z ; ρ es la densidad; T es la temperatura; p es la presión, μ es la viscosidad y C_p es el calor específico a una presión constante.

Euleriano-Euleriano

La estrategia Euleriana-Euleriana se enfoca matemáticamente en el movimiento del fluido en una ubicación específica en el espacio y trata las diferentes fases como continuos que se interpenetran y resuelve las ecuaciones de conservación para cada una de ellas (Ghaffarkhah, Ameri Shahrabi, & Keshavarz Moraveji, 2018).

Dado que el volumen de una fase no puede ser ocupado por las otras, se introduce el concepto de fracción de volumen fásico. Estas fracciones de volumen se supone que son funciones continuas de espacio y tiempo y su suma es igual a uno (Zamora, 2016).

Los tres modelos multifásicos Euler – Euler más utilizados son:

- Volum Of Fluid (VOF)
- Mixture
- Eulerian

Euleriano- Lagrangiano

El **Discrete Phase Model (DPM)** sigue el enfoque de Eulerian – Lagrange, donde la fase fluida se trata como un continuo resolviendo las ecuaciones de Navier-Stokes, mientras que

la fase dispersa se resuelve rastreando una gran cantidad de partículas, burbujas o gotitas a través del campo de flujo calculado.

La fase dispersa puede intercambiar cantidad de movimiento, masa y energía con la fase fluida, para esto requiere que la segunda fase dispersa ocupe una fracción de volumen baja inferior al 10%. Las trayectorias de partículas o gotas se calculan individualmente a intervalos específicos durante el cálculo de la fase fluida (ANSYS Inc, 2013).

Este método proporciona datos estadísticos útiles de las trayectorias de las partículas que pueden ser utilizados para la evaluación del rendimiento de los equipos (Ghaffarkhah, Ameri Shahrabi, & Keshavarz Moraveji, 2018). Debido a que el presente estudio emplea este modelo multifásico, se desarrolla su base teórica a continuación:

DPM predice la trayectoria de una partícula de fase discreta mediante la integración del equilibrio de fuerzas en la partícula, que se escribe en un marco de referencia lagrangiano. Este equilibrio de fuerzas iguala la inercia de la partícula con las fuerzas que actúan sobre ella y se puede escribir como:

$$\frac{d\bar{u}_p}{dt} = F_D(\bar{u} - \bar{u}_p) + \frac{\bar{g}(\rho_g - \rho)}{\rho_g} + \bar{F}$$

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

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

Donde $F_D(\bar{u} - \bar{u}_p)$ es la fuerza de arrastre por unidad de partícula de masa; \bar{u} y \bar{u}_p es la velocidad del fluido y la partícula; μ es la viscosidad del fluido; ρ y ρ_p es la densidad del fluido y la partícula y d_p es el diámetro de la partícula.

\bar{F} es una aceleración adicional producto de otras fuerzas:

- Fuerza de "masa virtual", que es la fuerza requerida para acelerar el fluido que rodea la partícula.
- Fuerzas que surgen por la rotación del marco de referencia móvil.
- Fuerza termoforética, que experimentan partículas pequeñas suspendidas en un gas en la dirección opuesta al del gradiente de temperatura.
- Fuerza browniana.

- Fuerza de sustentación de Saffman, o sustentación debido a cortante.

Distribución del diámetro de partícula: Una de las características básicas de una inyección es la distribución del tamaño de la partícula. Para lo cual uno de los modelos comúnmente utilizados es la distribución de Rosin-Rammler de dos parámetros, caracterizada por el tamaño de partícula más probable y un parámetro de dispersión. **El diámetro de la partícula más probable d_0** , se obtiene a partir del diámetro medio de Sauter d_{32} (ANSYS Inc, 2013).

Para flujos monofásicos, la siguiente correlación es utilizada para calcular d_{32} y relacionar el tamaño de partícula inicial con la turbulencia estimada del chorro de líquido:

$$d_{32} = 133\lambda We^{-0,74}$$

Donde $\lambda = d/8$ es el valor de longitud integral radial a la salida del chorro basada en un flujo de tubería turbulento completamente desarrollado, y We es el número de Weber, definido como:

$$We = \frac{\rho_l u^2 \lambda}{\sigma}$$

Aquí, σ es la tensión superficial de la partícula.

El segundo factor requerido para especificar la distribución del tamaño de las partículas es el **parámetro de dispersión**. Los valores para el parámetro de dispersión se eligen a partir de la experiencia de modelados anteriores y de observaciones experimentales. Cuanto mayor sea el valor del parámetro de dispersión, más estrecha será la distribución del tamaño de las partículas, en la Tabla 1-1 se encuentran los valores para diferentes estados de inyección.

Tabla 1-1 Parámetros de dispersión para diferentes estados de inyección

Estado	Parámetro de dispersión (S)
Monofásico	3,5
Cavitación	1,5

En conjunto el diámetro medio de Sauter d_{32} y el parámetro de dispersión s , estos se convierten al diámetro más probable d_0 de Rosim-Rammler:

$$d_0 = 1,2726d_{32} \left(1 - \frac{1}{s}\right)^{1/s}$$

Modelamiento Turbulento

Número de Reynolds (Re): Si este número es bajo, el flujo es ordenado con líneas de corriente paralelas. Si se incrementa, en algún momento, esta estructura del flujo laminar pierde su identidad, dando lugar a una estructura de flujo caracterizada por remolinos a gran escala (Sayma, 2009).

$$Re = \frac{\rho U D}{\mu}$$

Donde U es la velocidad promedio y D es el diámetro.

Flujo Turbulento: A valores del número de Reynolds por encima del crítico, se produce un cambio radical del carácter del flujo donde es completamente aleatorio y caótico. El movimiento se vuelve intrínsecamente inestable incluso con condiciones de contorno constantes, la velocidad y todas las demás propiedades del flujo varían de la misma forma. Este régimen se denomina **flujo turbulento** y una medición típica de la velocidad en este estado se observa en la Figura 1-2 (Versteeg & Malalasekera, 2007).

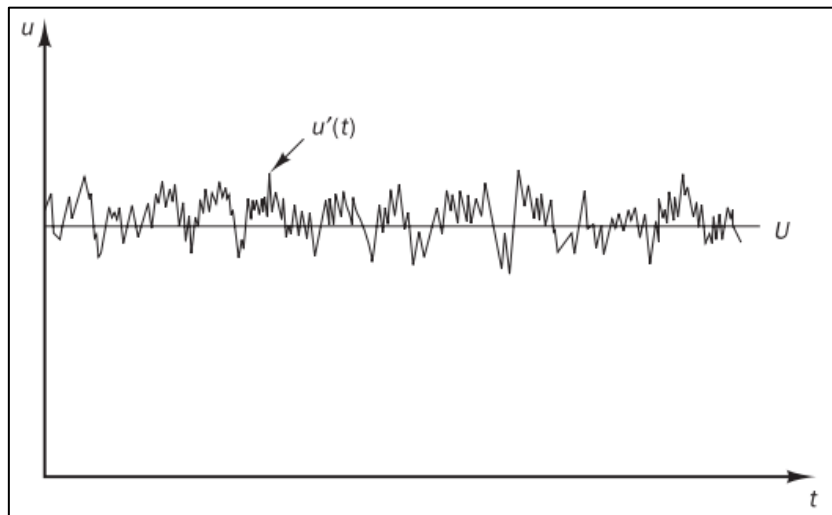


Figura 1-2 Velocidad bajo régimen turbulento (Versteeg & Malalasekera, 2007)

La velocidad se descompone en un valor medio constante U con un componente fluctuante $u'(t)$ superpuesto: $u'(t) = U + u'$, denominada **descomposición de Reynolds**. Ahora se

puede caracterizar un flujo turbulento en términos de los valores medios de las propiedades del flujo ($U, V, W, P, etc.$) y algunas propiedades estadísticas de sus fluctuaciones ($u', v', w', p', etc.$).

Reynolds Average Navier Stokes (RANS): Para cerrar el sistema de ecuaciones de gobierno en un sistema turbulento, en CFD existen varios enfoques para el modelado de turbulencia, generalmente los más utilizados son **second moment closure** y **eddy-viscosity o turbulent viscosity**. Este último será el descrito y utilizado en el presente proyecto, por su naturaleza práctica y menor consumo computacional denominado **Reynolds Average Navier Stokes (RANS)**. En este enfoque, se planteó la hipótesis de que los términos de tensión Reynolds se comportan como los términos viscosos y se introdujo una nueva cantidad llamada viscosidad turbulenta de modo que en el plano x-y se tiene la siguiente expresión (Sayma, 2009):

$$-\rho u'v' = \mu_t \frac{\partial \bar{u}}{\partial y} = \frac{\partial w}{\partial y}$$

Se reemplaza en las ecuaciones de momento, la viscosidad por la suma de las viscosidades y la viscosidad turbulenta:

$$\rho \left(\bar{u} \frac{\partial \bar{u}}{\partial x} + \bar{v} \frac{\partial \bar{u}}{\partial y} \right) = -\frac{\partial \bar{p}}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\left(\mu + \mu_t \frac{\partial \bar{u}}{\partial x} \right) \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\left(\mu + \mu_t \frac{\partial \bar{u}}{\partial y} \right) \right)$$

$$\rho \left(\bar{u} \frac{\partial \bar{v}}{\partial x} + \bar{v} \frac{\partial \bar{v}}{\partial y} \right) = -\frac{\partial \bar{p}}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\left(\mu + \mu_t \frac{\partial \bar{v}}{\partial x} \right) \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\left(\mu + \mu_t \frac{\partial \bar{v}}{\partial y} \right) \right)$$

Se han desarrollado varios modelos de diferentes niveles de complejidad para encontrar los términos de tensión de Reynolds que se pueden clasificar según el número de ecuaciones diferenciales resueltas para obtener esta incógnita. Las más simples de estas formas se denominan modelos de ecuación cero, en estos modelos, se utilizan relaciones algebraicas simples para obtener la distribución de la viscosidad de remolino. El siguiente orden de complejidad es usar modelos de una ecuación, donde se deriva una ecuación de transporte para la viscosidad turbulenta.

Estas ecuaciones de transporte son de naturaleza similar a la ecuación de cantidad de movimiento ya que contienen un término derivado del tiempo, convección, difusión y términos de fuente y sumidero. Los modelos de una ecuación más populares son el modelo de Spallart y Allmaras (1992) y el modelo de Baldwin y Barth (1990).

Otro nivel de complejidad proviene de resolver dos ecuaciones diferenciales o de transporte, una que representan la generación, transporte y disipación de la turbulencia. La viscosidad turbulenta se puede calcular a partir de los dos términos transportados en estas ecuaciones, ejemplos de modelos de turbulencia de dos ecuaciones son el $k - \varepsilon$, $k - \omega$ y $k - \omega SST$ (Sayma, 2009).

De acuerdo con los resultados de los análisis presentados durante la investigación de los estudios previos para equipos de separación, en este análisis se utiliza el modelo $k - \varepsilon$

- **Modelo $k - \varepsilon$:** Es el modelo de turbulencia más común y es usado con frecuencia en aplicaciones industriales por su robustez y por su bajo costo computacional. Consiste en resolver dos ecuaciones adicionales: para el transporte de energía cinética turbulenta k (que determina la energía en la turbulencia) y para la tasa de disipación de la energía cinética turbulenta ε (que determina la escala de la turbulencia). Esto le permite considerar efectos en la historia del flujo como convección y difusión de la energía turbulenta, se usa para flujos de alto número de Reynolds, sea en régimen incompresible o compresible con $Ma < 0.3$. El flujo cerca de las paredes es modelado usando funciones de pared, por tanto, no es simulado y puede ser aplicado en estudios estacionarios o dependientes del tiempo.

Discretización

La metodología de CFD se basa en reemplazar un fenómeno continuo mediante la división en un dominio discreto mediante una malla, donde los parámetros de flujo se definen en los nodos que forman la red. Luego se transforman las ecuaciones diferenciales parciales continuas y a las condiciones de frontera, en un conjunto de expresiones algebraicas que se resuelven en cada celda. Además de la discretización espacial también se debe realizar la discretización temporal del fenómeno.

Existen varios métodos para realizar la discretización de un dominio, pero considerando que en el estudio se empleó el método de los volúmenes finitos, a continuación, se describe esta metodología:

Métodos de volúmenes finitos: La derivación de la discretización de volumen finito se puede realizar a partir de la forma integral de las ecuaciones de conservación. Por ejemplo, la ecuación de continuidad puede ser expresada para un volumen de control Ω con una frontera de superficie Γ de la siguiente manera (Sayma, 2009):

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_{\Omega} \rho d\Omega + \int_{\Gamma} \rho \vec{U} d\vec{\Gamma} = 0$$

Similarmente, formulaciones integrales son obtenidas para las ecuaciones de conservación de momento y energía.

La formulación de volúmenes finitos comienza subdividiendo el dominio de la solución en pequeños volúmenes. Entonces podemos escribir la forma integral de las leyes de conservación para cada volumen por separado y la conservación global se puede obtener sumando los flujos de los subvolúmenes (Sayma, 2009).

Considerando que los valores discretos de la variable de campo se encuentren en los centros de las celdas, se interpola estos valores para obtener la variable en las caras del volumen. Para realizar la interpolación, se emplea un esquema upwind a partir de los valores de las celdas que se encuentran aguas arriba en la dirección del vector normal a la cara. Los esquemas upwind pueden ser de primer orden, segundo orden, ley exponencial y QUICK. (Zamora, 2016).

Generación de malla: El proceso de discretización convierte el sistema continuo en uno discreto, donde la solución aproximada se busca en los puntos discretos de la cuadrícula generada por la malla o rejilla.

Existen dos tipos de mallas, que se caracterizan por la conectividad de los puntos, figuras 1.5 y 1.6. Las **mallas estructuradas** tienen una conectividad regular, lo que significa que cada punto tiene el mismo número de vecinos. Las **mallas no estructuradas**, por otro lado, tienen una conectividad irregular donde cada punto puede tener diferente número de vecinos.

En algunos casos, parte de la grilla puede ser estructurada y parte no estructurada denominada **malla híbrida**, especialmente utilizada para geometrías complejas donde no sea posible aplicar una estructurada (Sayma, 2009).

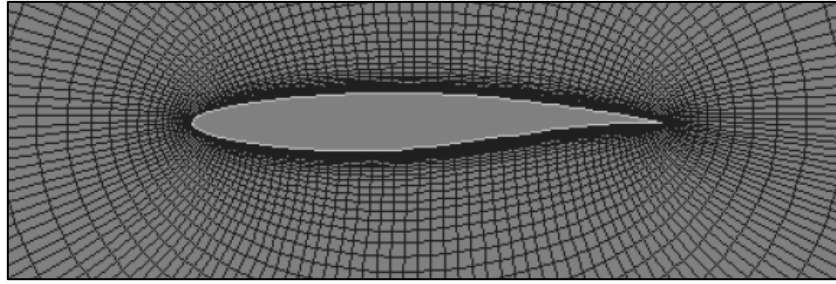


Figura 1-3 Malla estructurada (Sayma, 2009)

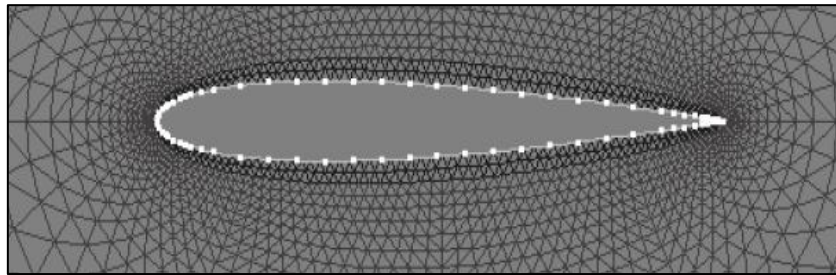


Figura 1-4 Malla no estructurada (Sayma, 2009)

1.5. Software ANSYS Fluent

ANSYS Fluent es un software de dinámica de fluidos computacional de uso general que se utiliza para modelar el flujo de fluidos, la transferencia de calor y masa, las reacciones químicas, etc. Este software permite desarrollar un análisis de CFD desde el preprocesamiento hasta el pos-procesamiento, con capacidades avanzadas de modelado de fenómenos físicos, que incluyen modelado de turbulencia, flujos monofásicos y multifásicos, combustión, modelado de baterías, interacción fluido-estructura, etc. (ANSYS Inc, 2013)

Flujo de trabajo en Fluent

El flujo de trabajo de ANSYS Fluent tiene un conjunto de cuatro componentes principales con funciones específicas que deben ser configuradas correctamente para que el sistema completo se ejecute de forma correcta.

Geometry: Es el espacio de trabajo para crear modelos 2D o 3D que necesitan procesarse para el desarrollo de simulaciones, estos espacios denominados ANSYS Design Modeler y ANSYS Space Claim tienen un diseño y funcionalidades similares a softwares tradicionales CAD. Las geometrías para Fluent también se pueden importar desde otro software CAD con formato .stp.

Mesh: El mallado es una parte integral en el análisis de Fluent que se realiza en el módulo ANSYS Mechanical y en el mismo ANSYS Space Claim. La malla permite dividir las geometrías en pequeños polígonos para que cada polígono se pueda procesar por separado. Cuanto más fina sea la malla, mejores serán los resultados, sin embargo, refinar demasiado la malla puede provocar excesivo tiempo y costo de procesamiento computacional.

Setup and Solution: La configuración, se inicia en el Launcher de ANSYS Fluent donde se selecciona las dimensiones, opciones de visualización y opciones de procesamiento (paralelo o múltiples procesadores de HPC).

Una vez en ANSYS Fluent, el árbol de trabajo incluye la configuración de modelos, la solución, las condiciones de contorno, la condición de la zona celular y las demás variables requeridas para generar el flujo de fluido o transferencia de calor. Debe tenerse en cuenta que para cada tipo de simulación CFD, hay un conjunto diferente de selecciones de configuración para generar resultados confiables para el modelo requerido.

Después de seleccionar el modelo para la simulación, se debe determinar el fluido y el sólido sobre el cual el fluido interactuará.

La especificación de las condiciones de contorno es una parte fundamental en la simulación CFD ya que permiten al software determinar las entradas y salidas de fluido y cómo se comportará cada superficie cuando esté en contacto. Si el flujo no es laminar, la determinación de los modelos de turbulencia es otro factor importante de la configuración.

La solución se procesa luego de configurar todas las variables de entrada. Aquí el solucionador ejecuta las iteraciones de las formulaciones y ecuaciones matemáticas antes explicadas hasta su convergencia.

CFD Post: En CFD-post, los resultados de las variables que se configuraron en Fluent se pueden ver y analizar visualmente. Aquí se puede observar una demostración simulada de cómo se comportará el modelo bajo los escenarios simulados. Se puede hacer contornos, líneas aerodinámicas, vectores, seguimiento de partículas, etc., que permiten ver cómo se comportará el modelo bajo condiciones reales (ANSYS Inc, 2013).

2. METODOLOGÍA

Para estudiar el comportamiento del flujo dentro del tanque, se ha desarrollado un dominio geométrico de acuerdo con los planos as-built del tanque perteneciente al sistema de tratamiento de agua de producción de la empresa Gente Oil Ecuador. Sobre este dominio se realiza la simulación CFD del flujo de agua en el interior del tanque bajo las condiciones de proceso reales para comparar los resultados y validar la aplicabilidad del modelo y proponer las mejoras de diseño.

La Figura 2-1 muestra la metodología de CFD utilizada para el desarrollo de la simulación con los pasos correspondientes:

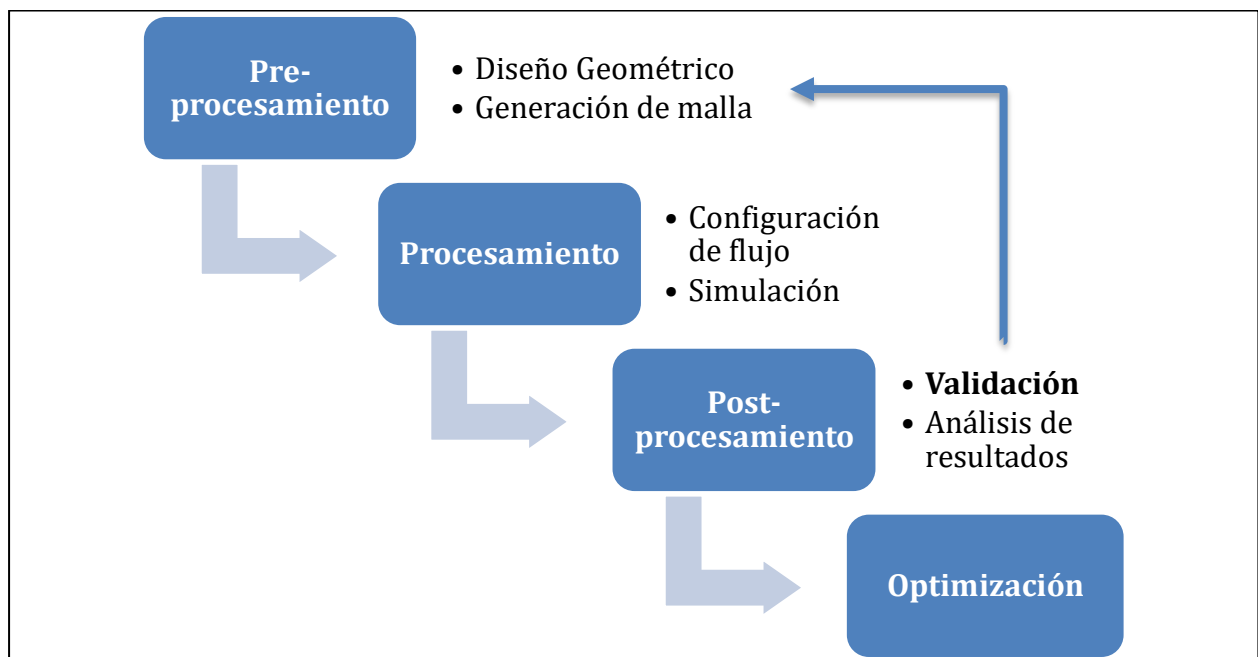


Figura 2-1 Metodología Simulación CFD

2.1 Preprocesamiento

Geometría del dominio

El diseño geométrico se realizó en base a la Figura 2-2 donde se muestra las características del tanque a partir de la ingeniería disponible, especificándose un diámetro es 3734 mm y una altura de 7320 mm. Para simplificación del dominio solo se consideran la boquilla y tubería de

ingreso de agua producto de la deshidratación del crudo producido con las dimensiones y ubicaciones que se detallan en la Tabla 2-1.

El límite superior del dominio se ubicó a 5000 mm considerando que es la altura a la que se ubica el colector de desnate donde se produce el atrapamiento de las partículas de petróleo. El espesor de las placas de acero que conforman la pared del tanque es 6 mm por lo que el diámetro interno del recipiente es 3722 mm.

Tabla 2-1 Dimensiones y ubicaciones de boquillas e internos (Gente Oil Ecuador Pte. Ltd, 2022)

N°	Descripción	Diámetro (in)	Elevación Boquilla (mm)	Orientación (° + mm)	Elevación Tubería Interna (mm)
N4	Ingreso agua	6	410	90°+350	1103
N8A	Descarga desnate	8	2200	0°	5000
N8B	Descarga agua tratada	8	2200	180°	1250

A partir de las dimensiones antes indicadas, el diseño geométrico 3D se realizó en el software ANSYS Space Claim como se observa en la vista isométrica del tanque en la Figura 2-3 y en la extracción del volumen interno para la simulación de flujo en la Figura 2-4.

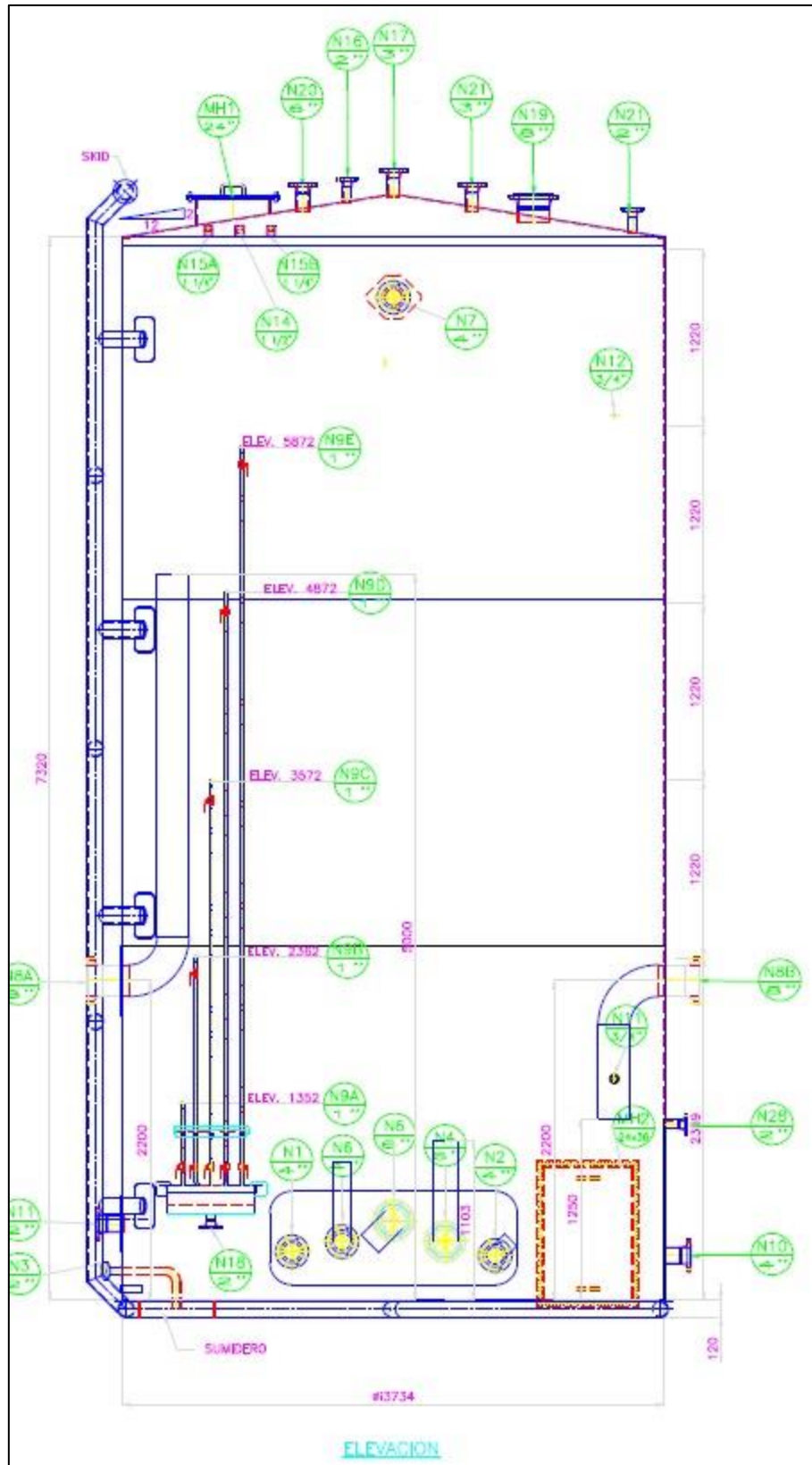


Figura 2-2 Tanque actual (Gente Oil Ecuador Pte. Ltd, 2022)

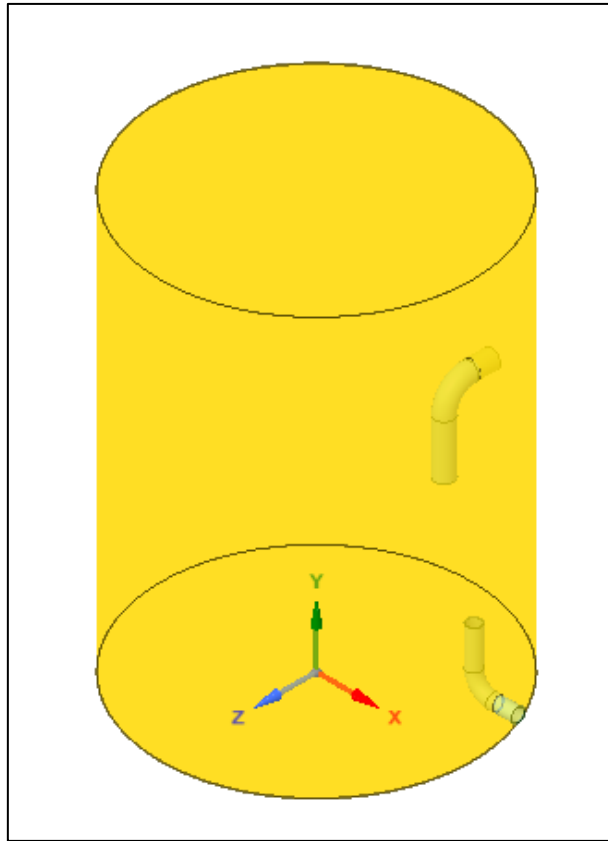


Figura 2-3 Geometría 3D (Vista Isométrica) Tanque actual

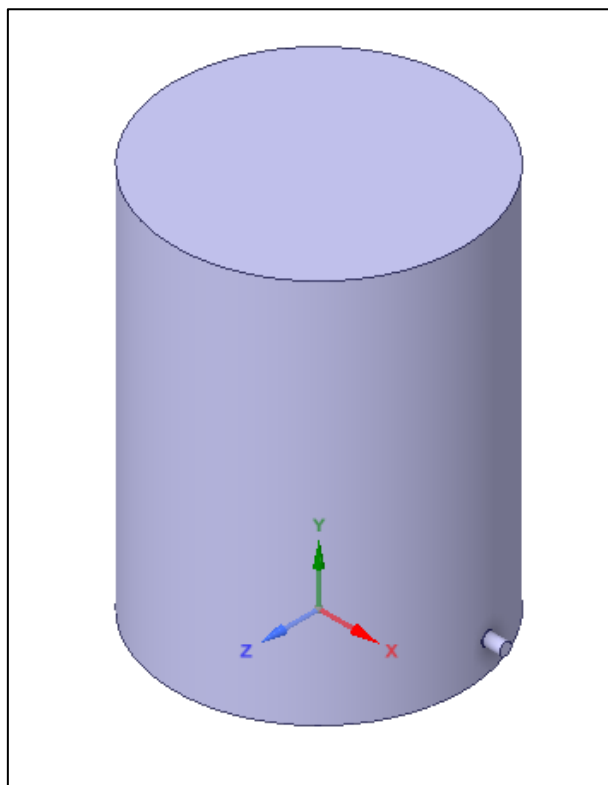


Figura 2-4 Extracción de volumen interno Tanque actual

Malla computacional

En este trabajo, para la discretización del dominio de flujo se generó un sistema de mallado en el software ANSYS Meshing mediante un esquema no estructurado tetrahédrico como se observa en la Figura 2-5. En la Figura 2-6 se observa el refinamiento realizado en las tuberías de ingreso y salida debido a la geometría de las zonas.

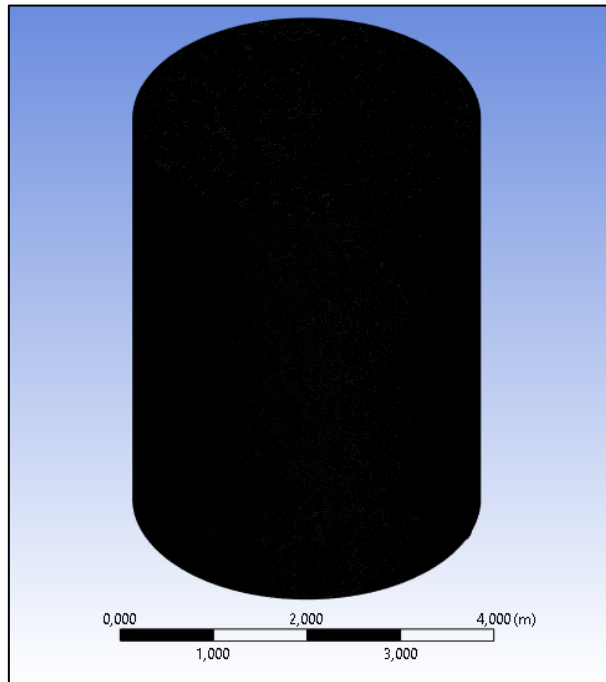


Figura 2-5 Malla de Tanque actual

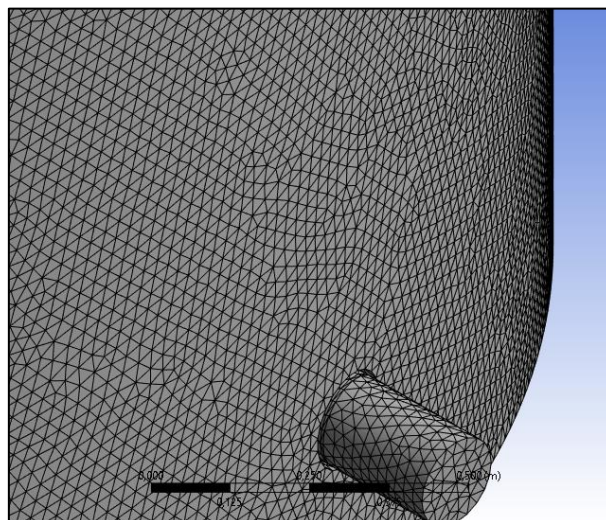


Figura 2-6 Refinamiento de malla

Independencia: Para garantizar la calidad y correcta cantidad de elementos del modelo, se realizó una prueba de independencia de malla cambiando la cantidad de celdas hasta que los resultados en las variables de control no variaron por el incremento de elementos.

Para este propósito, se evaluó la Velocidad en el punto (0; 2,5; 0) m ubicado en el centro del plano y – z que se muestra en la Figura 2-7, de tal manera que se encontró un equilibrio entre la cantidad de elementos mínimos requeridos para obtener resultados confiables sin exceder los recursos computacionales y tiempos de simulación.

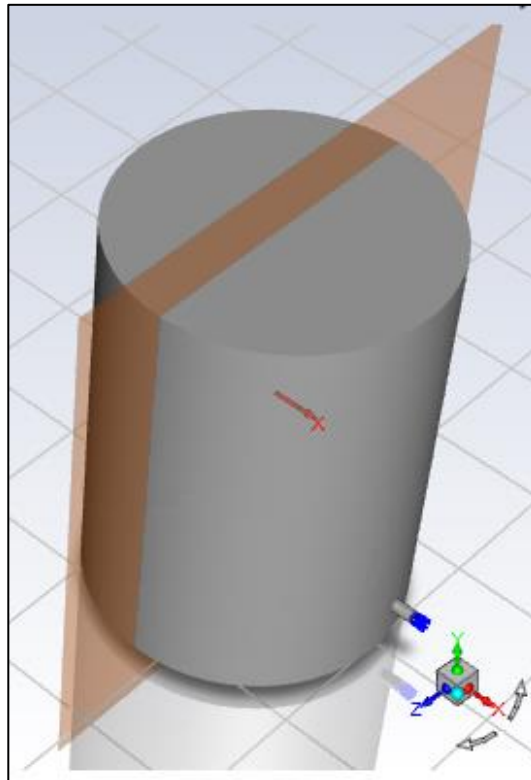


Figura 2-7 Punto de evaluación de independencia de malla

Calidad de malla: Se analizó ortogonalidad, relación de aspecto y asimetría que tienen un impacto significativo en la precisión de la solución numérica.

- **La calidad ortogonal** se calcula para las celdas usando el vector desde el centroide de la celda hasta cada una de sus caras, el vector de área de la cara correspondiente y el vector desde el centroide de la celda hasta los centroides de cada una de las celdas adyacentes. Las peores celdas tendrán una calidad ortogonal más cercana a 0, con las mejores celdas más cerca de 1, la calidad ortogonal mínima para todos los tipos de celdas debe ser superior a 0,01 con un valor promedio significativamente mayor.

- **La relación de aspecto** es una medida del estiramiento de la celda. En general, es mejor evitar cambios repentinos y grandes en las proporciones de las celdas en áreas donde el campo de flujo muestra grandes cambios o fuertes gradientes.
- **La asimetría** se define como la diferencia entre la forma de la celda y la forma de una celda equilátera de volumen equivalente. Las celdas muy sesgadas pueden disminuir la precisión y desestabilizar la solución. Una regla general es que el sesgo máximo para una malla triangular/tetraédrica en la mayoría de los flujos debe mantenerse por debajo de 0,95, con un valor promedio significativamente más bajo.

2.2 Procesamiento

Para continuar con el desarrollo del caso, fue necesario configurar el modelo en ANSYS Fluent para resolver el flujo en el interior del tanque. Se inició en modo 3 ddp (3 dimensiones y doble precisión) y se cargó la geometría y malla previamente analizada.

En esta sección se definió el tipo de simulación, modelos de flujo, modelos de turbulencia, propiedades de los fluidos, condiciones de borde, diámetro, concentraciones de las partículas y controles de convergencia que son los factores que afectan los cálculos de comportamiento de los fluidos.

Condiciones de operación

En la Tabla 2-2 y Tabla 2-3 se muestra las condiciones de operación y propiedades de los flujos en el interior del tanque actual a partir de los reportes de producción y análisis de laboratorio de la operadora Gente Oil Ecuador, a partir de estos datos se definieron las condiciones requeridas en las siguientes etapas de la configuración.

Tabla 2-2 Condiciones de operación Tanque actual (Gente Oil Ecuador Pte. Ltd, 2022)|

Parámetro	Valor
Presión Operación (Pa)	atm
Temperatura Operación (F)	160,00
Caudal de agua (BPD)	16000

Tabla 2-3 Propiedades de flujos (Gente Oil Ecuador Pte. Ltd, 2022)

Fase	Densidad (kg/m ³)	Velocidad (m/s)	Viscosidad (kg/m-s)	Inlet (ppm-mg/l)	Outlet (ppm-mg/l)
Agua producción (primaria)	1020,00	1,74	0,000399	----	
Petróleo (secundaria)	917,64	----	0,117	480-481	143-143,3

Además, se utilizó la ecuación logarítmica de (Rosin & Rammler, 1933) para determinar la distribución de tamaños de las partículas de la fase secundaria en el dominio del fluido.

$$Y_{(d)} = 1 - e^{\left(\frac{-d}{\bar{d}}\right)^n}$$

Donde, $Y_{(d)}$ es la función de fracción de masa, n es el parámetro de dispersión que describe la uniformidad de las partículas, \bar{d} es el diámetro de Rosin – Rammler en μm y d es el diámetro de la partícula en μm debido a que esta ecuación describe de mejor manera una distribución de tamaño de partícula establecida por impacto o cizallamiento y que aún no ha tenido tiempo de equilibrarse (Ghaffarkhah, Ameri Shahrabi, & Keshavarz Moraveji, 2018).

(Ghaffarkhah, Ameri Shahrabi, & Keshavarz Moraveji, 2018) generaron la distribución de partículas con un diámetro de dispersión n de 2,6 y los diámetros máximos, mínimo y promedio de 560, 50 y 140 μm respectivamente para la fase de petróleo.

Condiciones de borde

En la Tabla 2-4 se muestra las condiciones de contorno utilizadas en la configuración. Se definió una condición de entrada tipo velocity para el ingreso de fluido, mientras que para la salida se usó una condición tipo pressure.

Para el modelo DPM, los límites de entrada y salida se establecieron como una zona de escape a través de este límite. Para la pared superior del tanque (zona de desnatado) se asumió como un área de atrapamiento, mientras que para las partículas que llegan a las paredes laterales y de fondo del tanque se reflejan.

Tabla 2-4 Condiciones de contorno

Ubicación	Descripción
Inlet	Frontera: Velocity inlet Velocidad del fluido (m/s): 1.74 Intensidad de turbulencia (%): 50 Diámetro hidráulico (m): 0.154 Frontera Fase Discreta (DPM): escape
Outlet	Frontera: Pressure outlet Presión manométrica (Pa): 27579 Intensidad de turbulencia (%): 50 Diámetro hidráulico (m): 0.203 Frontera Fase Discreta (DPM): escape
Skim	Frontera: Wall No-slip condition Frontera Fase Discreta (DPM): trap
Walls	Frontera: Wall No-slip condition Frontera Fase Discreta (DPM): reflect Normal: 0.1 Tangencial: 0.05

Discretización y solución numérica

En este estudio, la simulación realizada tuvo la siguiente configuración y características: Estado ESTACIONARIO mediante la utilización del método de VOLÚMENES FINITOS para discretizar y resolver las ecuaciones diferenciales parciales. El solver seleccionado fue PRESSURE BASED que se utiliza para modelado de flujos incompresibles y como esquema de acoplamiento presión – velocidad se utilizó el algoritmo SIMPLE.

Como modelo multifásico se utilizó DPM junto al modelo de turbulencia $k - \varepsilon$, para discretizar las ecuaciones de energía cinética turbulenta, tasa de dispersión turbulenta y de cantidad de movimiento se utilizó la aproximación FIRST – ORDER UPWIND, mientras que el esquema de discretización PRESTO se usó para interpolar los valores de presión.

Configuración del modelo DPM:

Además de resolver ecuaciones de transporte para la fase continua, en ANSYS Fluent se simuló una segunda fase discreta en un marco de referencia lagrangiano. Esta segunda fase consistió en partículas de petróleo esféricas dispersas en la fase agua continua para la realización del siguiente modelado:

- Cálculo de la trayectoria de la fase discreta (petróleo) incluyendo su inercia, el arrastre hidrodinámico y la fuerza de gravedad.
- Predicción de los efectos de la turbulencia en la dispersión de partículas.
- Ruptura y coalescencia de las partículas de petróleo.

Para incluir la fase discreta de petróleo en el modelo, se definió la posición inicial, la velocidad y el tamaño de las partículas. Estas condiciones iniciales, junto con las entradas que definen las propiedades físicas de la fase discreta, se utilizaron para iniciar los cálculos de trayectoria que se basan en el equilibrio de fuerzas sobre la partícula utilizando las condiciones locales de fase continua a medida que las partículas se mueven a través del flujo de acuerdo con el diagrama de la Figura 2-8.

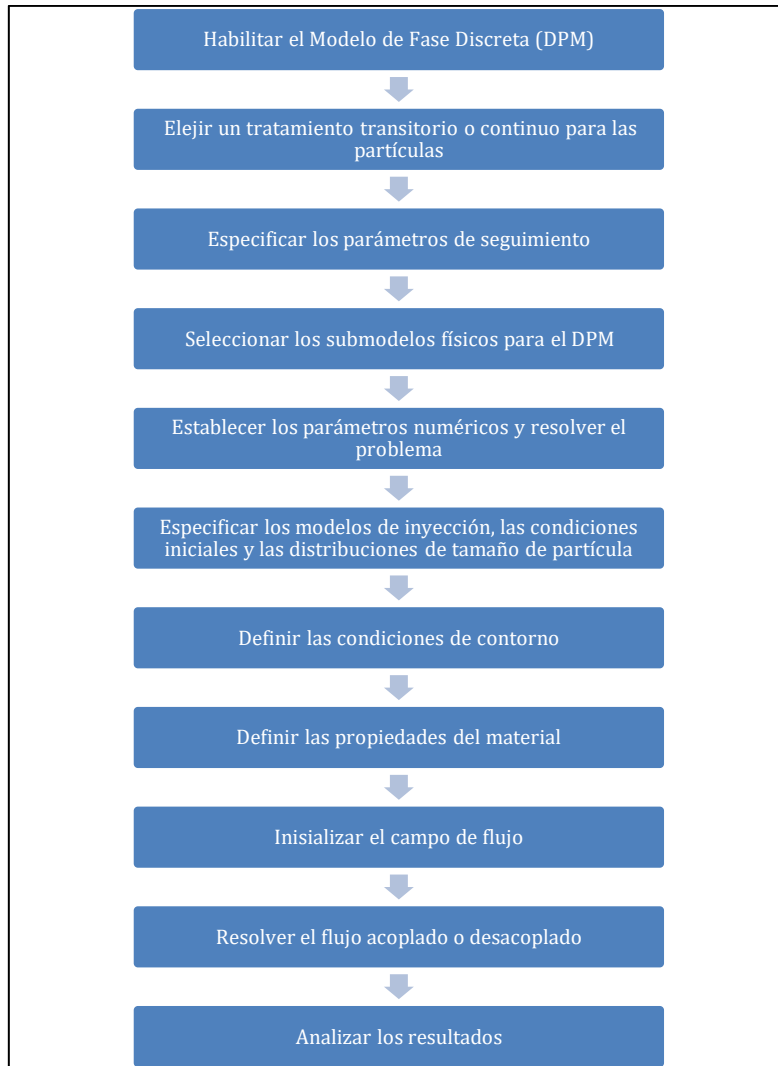


Figura 2-8 Configuración de Modelo de Fase Discreta (DPM)

Luego de habilitar el Modelo de Fase Discreta se seleccionó un tratamiento TRANSITORIO para el seguimiento de las partículas de petróleo, esto debido a que se consideró los fenómenos de colisión y coalescencia, los mismos que provocan variaciones en las partículas con el tiempo.

La creación de los paquetes de partículas (parcels) fue realizada por el método STANDARD de Fluent que inyecta un paquete de partículas por cada corriente y paso de tiempo. El número de partículas en el paquete NP , se determina de la siguiente forma:

$$NP = m_s \frac{\Delta t}{m_p}$$

Donde m_s es la rata de flujo másico de la corriente de partículas, Δt es el paso de tiempo y m_p es la masa de la partícula.

El máximo número de pasos fue seteado como 500 y el factor de longitud de paso fue 5, estos coeficientes son utilizados para abortar el cálculo de la trayectoria de las partículas cuando no salen del dominio de flujo evitando un rastreo infinito y para establecer el paso de tiempo de la integración dentro de cada volumen de control antes que la ecuación de movimiento sea resuelta nuevamente.

Para los parámetros numéricos utilizados en el control del rastreo de partículas se habilitó la opción de esquema de seguimiento AUTOMÁTICO que proporciona un mecanismo para cambiar de forma automática entre esquemas de orden inferior numéricamente estables y esquemas de orden superior, que son estables solo en un rango limitado de acuerdo con que se alcance o no el equilibrio hidrodinámico.

En la definición de materiales se seleccionó como fase continua agua de producción y petróleo como fase discreta con las propiedades de los fluidos indicadas en las secciones anteriores.

El tipo de inyección seleccionada fue de SUPERFICIE donde se liberará una corriente de partículas desde las caras de cada celda ubicada en la superficie seleccionada. El tipo de partícula utilizada fue INERTE que se caracteriza por ser un elemento que obedece el equilibrio de fuerzas y variación de temperatura. Se definió la velocidad en dirección normal a la cara de entrada de -1,74 m/s, la temperatura inicial absoluta de 344,26 K y la rata de flujo másico como 0,028 kg/seg.

Para la definición aleatoria del tamaño de la partícula se utilizó el Método de Distribución de Diámetro de Rosin-Rammler con los siguientes parámetros obtenidos de fluidos reales:

- Diámetro mínimo: 50 μm
- Diámetro máximo: 560 μm
- Diámetro medio: 140 μm
- Parámetro de dispersión: 2,6

2.3 Post procesamiento

Previo a la obtención de los resultados se graficó los valores de residuales y se registró los parámetros de calidad e independencia de malla que garanticen la fidelidad de los resultados de la fase de procesamiento.

Luego de validar la calidad de la malla, se procedió a realizar el Post-Procesamiento, donde se crearon los perfiles y contornos correspondientes a variables como velocidad de flujo, trayectoria de partículas, animaciones, etc.

Independencia de malla

Inicialmente se analizó la influencia del número de elementos sobre los resultados obtenidos con la metodología anteriormente explicada hasta obtener la independencia de malla en el Caso DP3 como se muestran en Tabla 2-5 y las Figura 2-9 con un total de 202442 elementos, a partir de este resultado, esta malla es utilizada para continuar la obtención de los resultados de la simulación.

Tabla 2-5 Independencia de malla

Malla	N° Elementos	N° Nodos	Velocidad (m/s)
DP 0	117038	22489	0,0334
DP 1	141193	27331	0,0341
DP 2	168476	32735	0,0549
DP 3	202442	39238	0,0547
DP 4	271012	52296	0,0553
DP 5	321829	61901	0,0575

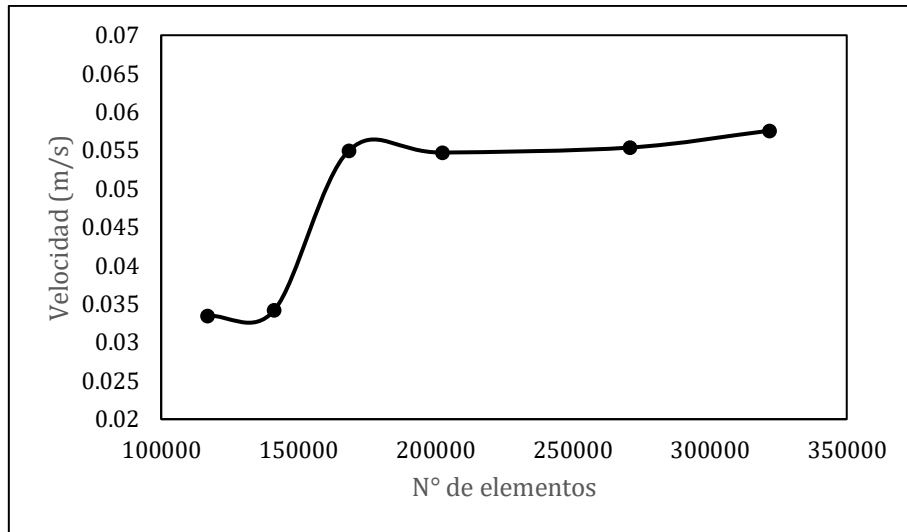


Figura 2-9 Independencia de malla (velocidad)

Calidad de la malla

La calidad global de la malla se determinó en términos de calidad de los elementos, relación de aspecto, asimetría y ortogonalidad, como muestran los resultados de la malla de la Tabla 2-6 y la Figura 2-10, la mayoría de los elementos tienen una calidad aceptable para la simulación dentro de los parámetros permitidos.

Tabla 2-6 Parámetros de calidad de malla Tanque actual

Parámetro	Mínimo	Máximo	Promedio
Calidad de elemento	0,25	1,00	0,84
Relación de aspecto	1,16	10,11	1,83
Skewness (asimetría)	0	0,82	0,22
Ortogonalidad	0,18	1,00	0,78

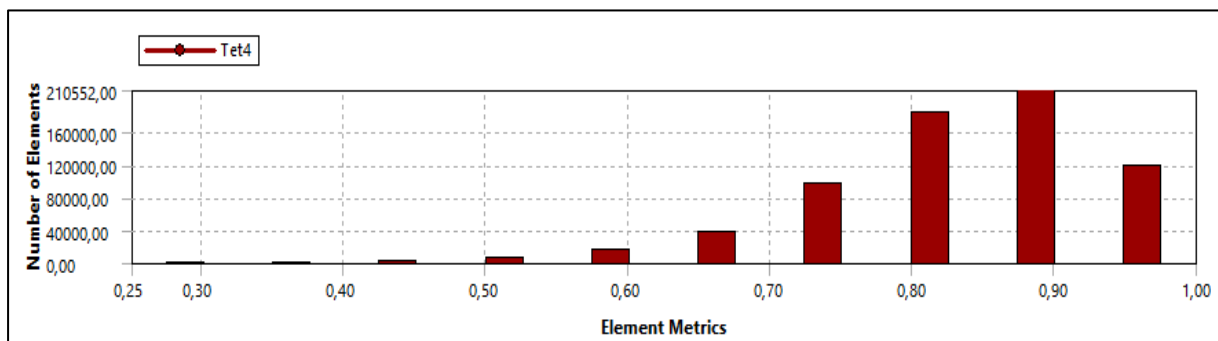


Figura 2-10 Calidad de elementos de malla Tanque actual

Residuales de simulación

Los residuales son la diferencia entre el valor de una variable en específico entre cada iteración indicando la convergencia y estabilidad de la resolución numérica de las ecuaciones de conservación en cada iteración.

Como criterio de convergencia los valores de los residuales globales deben ser bajos, como se observa en Figura 2-11 se ha alcanzado valores del orden de 10^{-4} y 10^{-5} para todas las ecuaciones de continuidad, velocidad por cada eje y las variables del modelo de turbulencia.

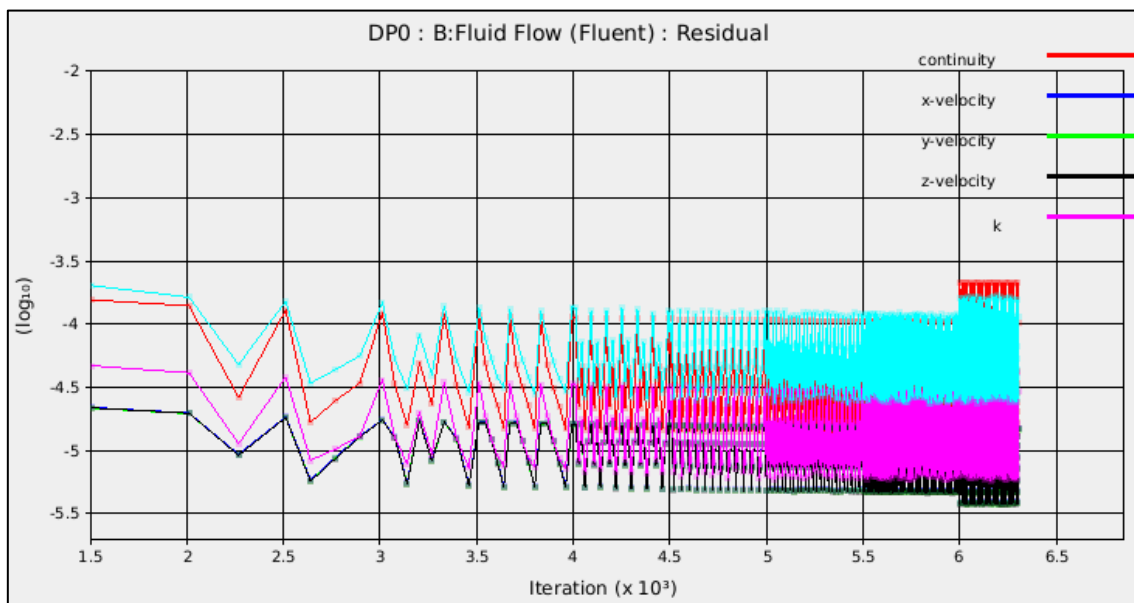


Figura 2-11 Residuales de la simulación numérica

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En este estudio, se empleó el software comercial ANSYS Fluent utilizando el modelo multifásico DPM con el modelo de turbulencia $k - \varepsilon$. Con DPM en estado transitorio se determinó el rendimiento de la separación y el comportamiento del fluido bifásico incluyendo fenómenos de colisión y coalescencia. Para determinar la eficiencia se analizó la distribución másica de gotas o partículas de petróleo en las descargas de agua y desnatado.

3.1 Modelo de tanque actual

La primera fase del estudio consistió en validar el modelo y obtener los resultados del tanque bajo el diseño y condiciones actuales.

Validación de resultados

Para validar el método desarrollado, se compararon los datos de simulación con datos de laboratorio pertenecientes a la operación real del tanque durante 10 días (18 de octubre de 2022 al 27 de octubre de 2022) **Anexo 2**.

Por ser un modelo DPM en estado transitorio se simuló el flujo hasta lograr una estabilización de la concentración de salida en (mg/l), lográndose este objetivo a los 1890 segundos (31,5 minutos) y 6300 iteraciones, en el gráfico se representa la estabilización del modelo a partir de 1710 segundos donde la concentración de salida se mantiene alrededor de 146 mg/l.

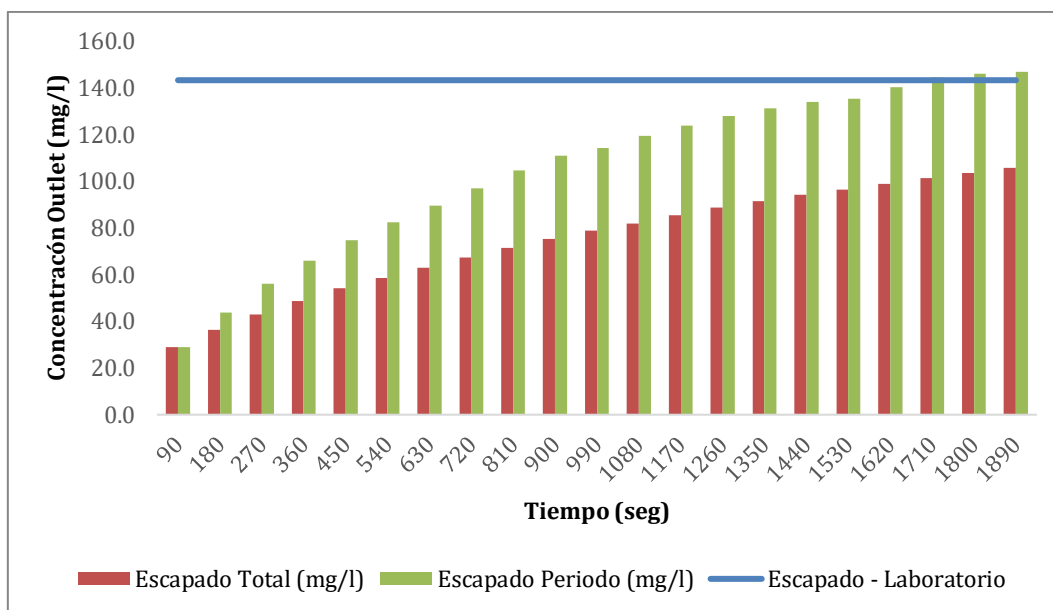


Figura 3-1 Estabilización de la simulación Tanque actual

Una vez estabilizado el modelo de simulación se determinó el error porcentual entre la concentración de salida de laboratorio y el calculado por la simulación. En la Tabla 3-1 se observa que el error obtenido luego de la estabilización es 2,44%, de esta manera se determinó que el modelo CFD utilizado es capaz de reproducir el desempeño del tanque desnatador. En el **Anexo 3** se presenta la tabla completa de la simulación desde el tiempo 0 a 1890 segundos.

Tabla 3-1 Comparación de resultados (Laboratorio vs Simulación)

Fase	Inlet Laboratorio (ppm-mg/l)	Inlet Simulación (ppm-mg/l)	Outlet Laboratorio (ppm-mg/l)	Outlet Simulación (ppm-mg/l)	Error (%)
Petróleo (secundaria)	480-481	480-481	143-143,3	146,5-146,8	2,44

Tiempo de retención del tanque actual

La separación de petróleo y agua es un proceso fundamentado en la gravedad y la diferencia de la densidad de los fluidos. Sin embargo, el principal inconveniente para lograr una exitosa separación de fases es un tamaño de recipiente adecuado que provea un tiempo de residencia o retención suficiente para el flujo que ingresa en su interior.

El modelo CFD permitió realizar un rastreo de las partículas de petróleo inyectadas en la tubería de ingreso de fluido al tanque hasta su atrapamiento en la zona de desnate o el escape a través de la tubería de salida de fluido y las que se mantienen en el interior del recipiente.

Se comparó el tiempo de retención teórico calculado por el desplazamiento volumétrico del fluido (16000 Barriles por día en un volumen de 342,17 Barriles) es 30,80 minutos o 1847,72 segundos con los tiempos de retención de las partículas obtenidos del modelo de simulación señalados en la Tabla 3-2.

Tabla 3-2 Tiempos de retención de partículas simulado

Descripción	Tiempo mínimo (seg)	Tiempo máximo (seg)	Tiempo promedio (seg)	Desviación estándar
Interior del Tanque	0,3	1890	651,1	496,6
Escapado (Outlet)	3,42	1886	344,4	0
Atrapado (Skim)	19,4	1889	489,7	0

El tiempo promedio de retención de las partículas que escapan del tanque es 344,4 segundos, lo que representa el 18,64% del tiempo teórico.

A continuación, se presentan los gráficos de las partículas en función de su tiempo de retención desde el inicio de la inyección ($t = 0$ segundos hasta $t = 454$ segundos) Figura 3-3 y Figura 3-3 donde se observa que gran parte de las partículas son arrastradas directamente a la salida del recipiente sin tener el tiempo suficiente para su ascenso a la zona de desnate.

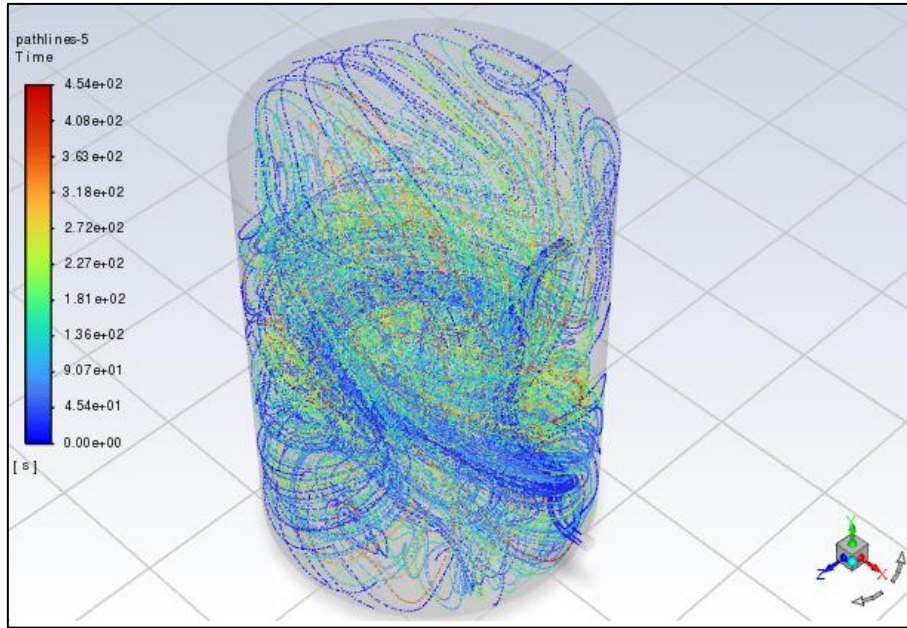


Figura 3-2 Vista Isométrica trayecto de partículas de petróleo

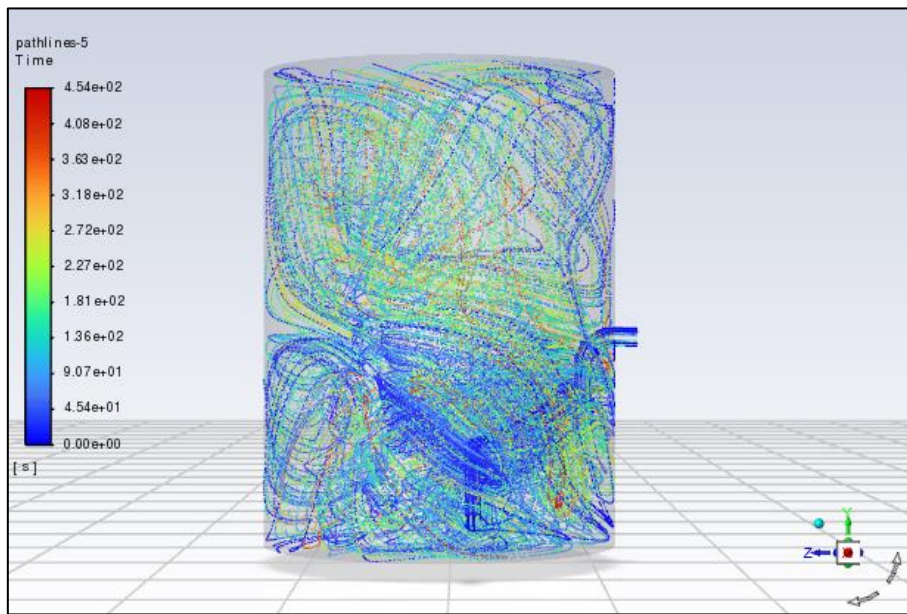


Figura 3-3 Vista Y-Z trayecto de partículas de petróleo

Patrones de flujo del tanque actual

La Figura 3-4 y Figura 3-5 indican varios patrones de remolinos que son característicos de recirculación y cortocircuitos en el interior del tanque.

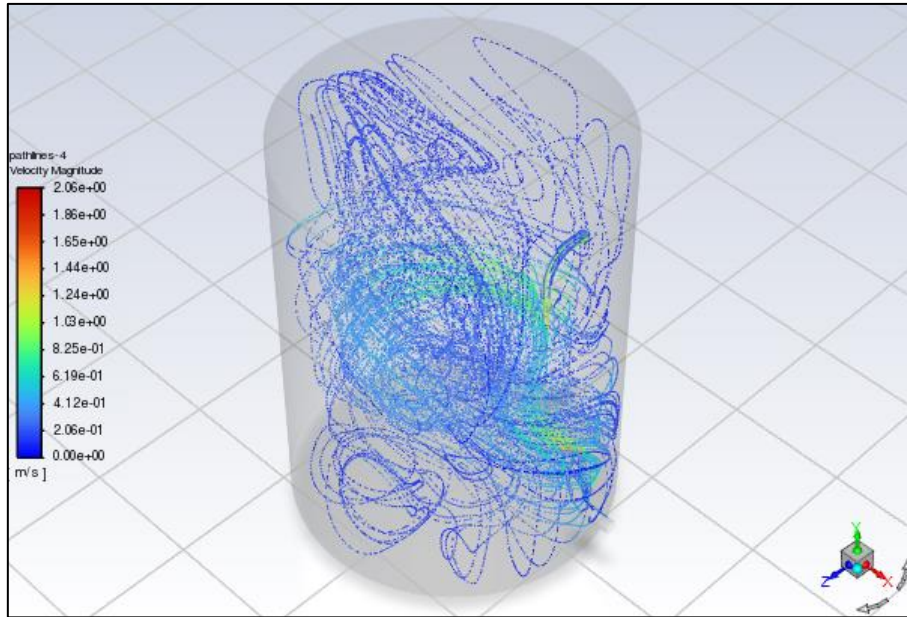


Figura 3-4 Vista Isométrica de líneas de flujo de velocidad

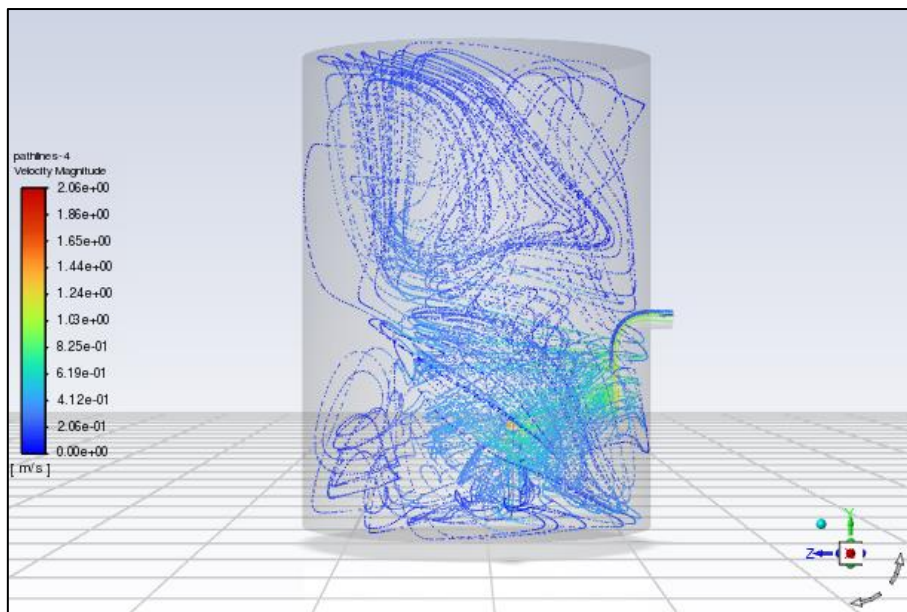


Figura 3-5 Vista Y-Z de líneas de flujo de velocidad

La Figura 3-6, Figura 3-7 y Figura 3-8 indican altas magnitudes de velocidad en la entrada y salida del tanque lo que provoca el arrastre prematuro de las partículas de petróleo.

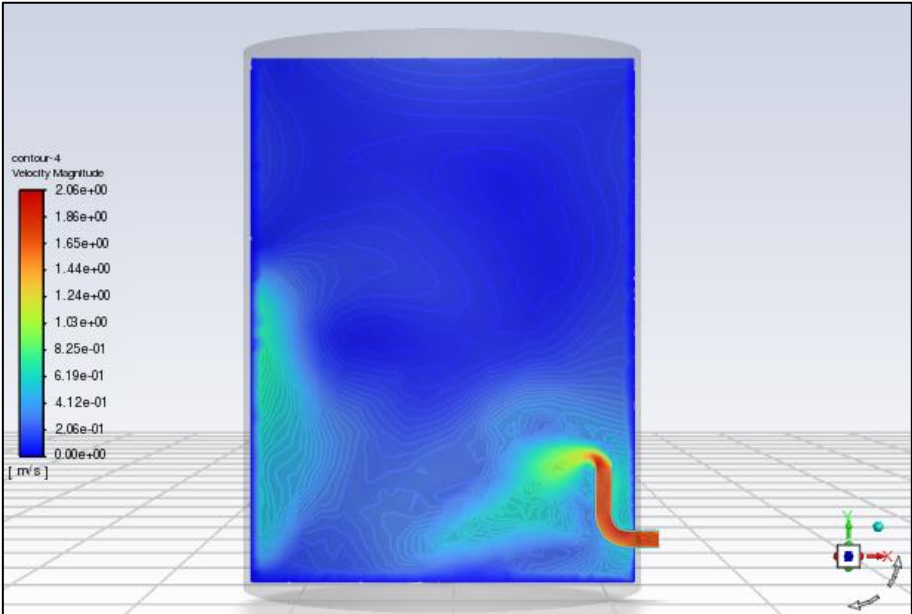


Figura 3-6 Vista X-Y Contorno de velocidad (inlet)

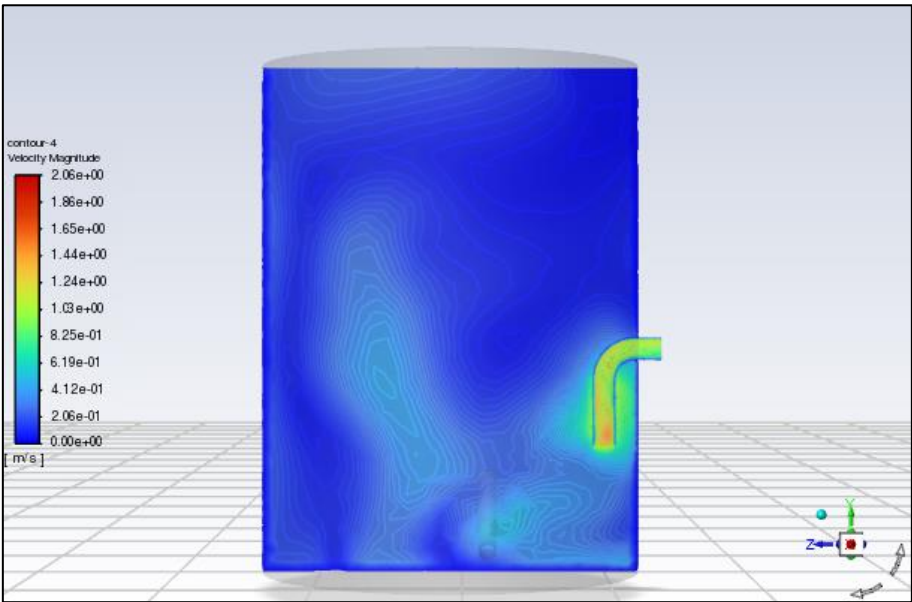


Figura 3-7 Vista Y-Z Contorno de velocidad (outlet)

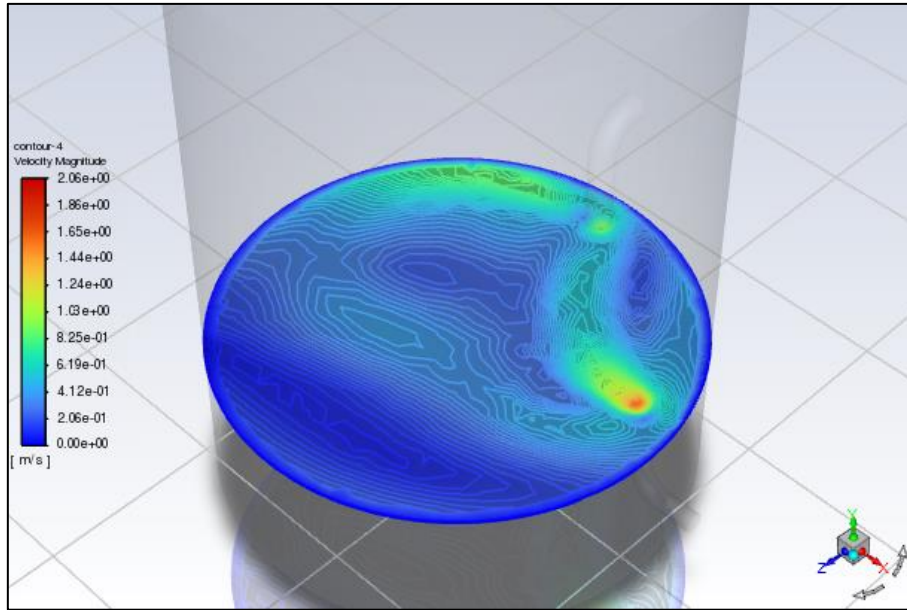


Figura 3-8 Vista Z-X Contorno de velocidad (Inlet – Outlet)

Eficiencia de separación del tanque actual

La eficiencia fue calculada en términos de la masa de petróleo que ingresó a través del inlet, su salida a través del outlet y la atrapada en la zona de desnate como se puede ver en la Tabla 3-3 donde se explica que 21,58 % de la masa total de petróleo que ingresa sale junto al agua tratada y el 33,71 % es atrapada en la zona de desnate. Mientras que en el último periodo analizado el 29,05 % y el 51,19 % escapa y es atrapada respectivamente.

Tabla 3-3 Eficiencia de separación de simulación

Descripción	Masa último periodo (kg)	% Eficiencia último periodo	Masa total (kg)	% Eficiencia total
Inyectada	1,26	---	23,52	---
Escapada (Outlet)	0,366	29,05 %	5,077	21,58 %
Atrapada (Skim)	0,645	51,19 %	7,928	33,71 %
En fluido	0,25	19,76 %	10,54	44,71 %

Finalmente, la eficiencia de separación fue calculada mediante la siguiente ecuación:

$$Eff_{sep} = \frac{M_{in} - M_{out}}{M_{in}}$$

$$Eff_{sep} = \frac{1,26 - 0,366}{1,26} \times 100 = 70,95\%$$

3.2 Modelo de tanque propuesto

Luego de analizar los resultados del tanque actual, se buscó diseñar nuevos accesorios internos que permitan mejorar las condiciones de separación en el interior del tanque aumentando el tiempo de retención de las partículas y eliminando cortocircuitos del flujo bajo las mismas condiciones del modelo validado.

Debido al rápido arrastre observado en los contornos de velocidad y trayectoria de las partículas en el modelo de simulación inicial, se buscó realizar las siguientes modificaciones indicadas en la Figura 3-11:

- Alejar la boquilla de entrada al extremo opuesto de la boquilla de salida (0° y 180° respectivamente) y ubicarla a una elevación de 4000 mm.
- Disminuir la velocidad de ingreso incrementando el diámetro de la boquilla de entrada (6" a 8").
- Ubicar un difusor que inyecte un flujo de menor velocidad en el interior del tanque mediante una tubería ranurada Figura 3-9.
- Incrementar el diámetro del colector de descarga de agua (8" a 10") y colocación de una rejilla en su ingreso para disminuir turbulencia Figura 3-10.

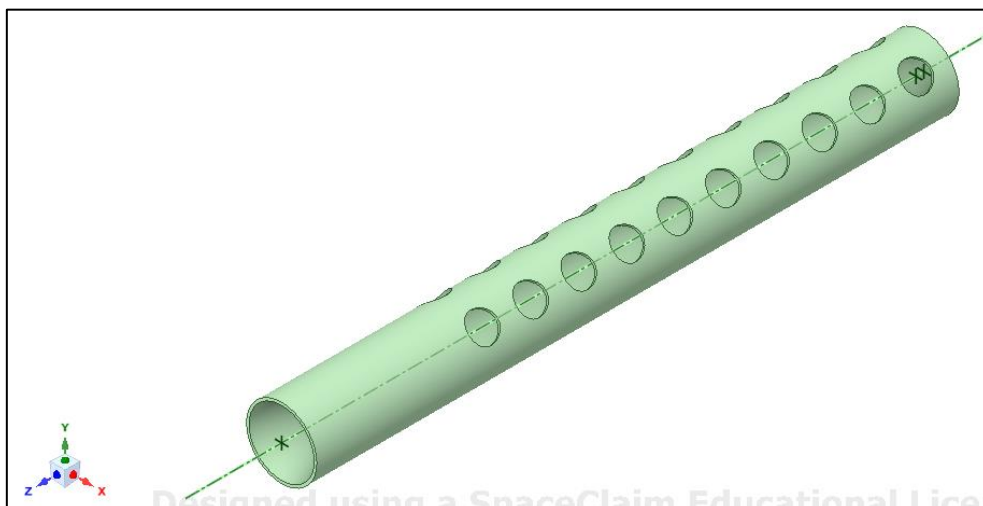


Figura 3-9 Difusor de ingreso de fluido propuesto

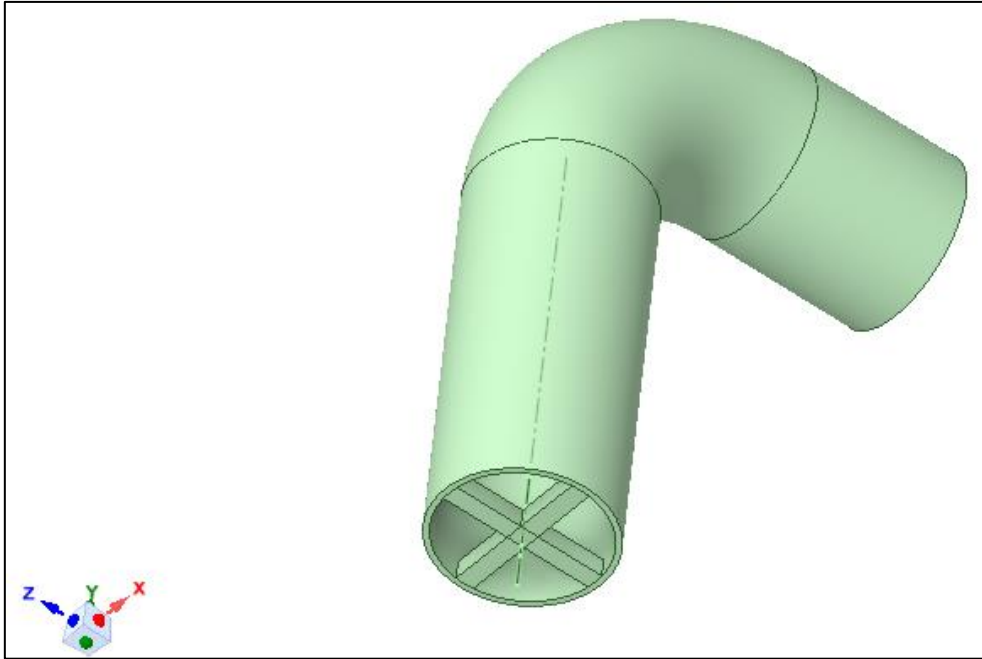


Figura 3-10 Colector de descarga de fluido propuesto

Las características de la malla de esquema no estructurado tetrahédrico con 386187 elementos se observan en la Figura 3-12, Figura 3-13 y Tabla 3-4.

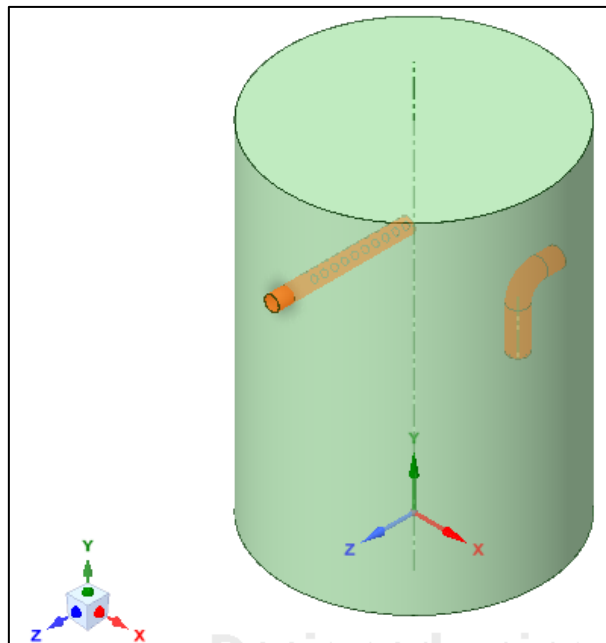


Figura 3-11 Geometría de tanque propuesto



Figura 3-12 Malla de tanque propuesto

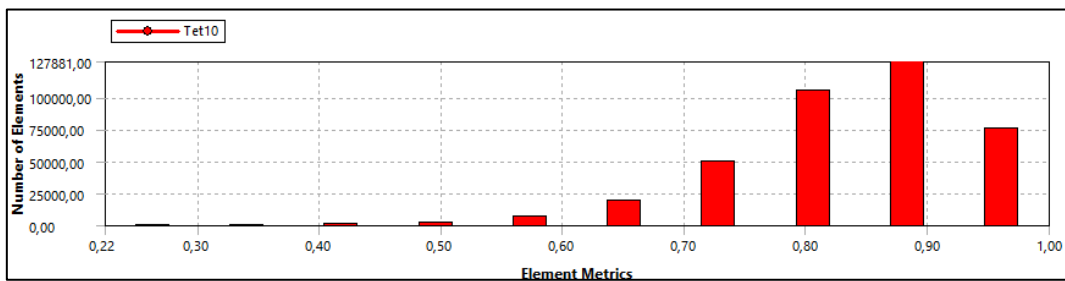


Figura 3-13 Calidad de elementos de malla de tanque propuesto

Tabla 3-4 Parámetros de calidad de malla de tanque propuesto

Parámetro	Mínimo	Máximo	Promedio
Calidad de elemento	0,22	1,00	0,84
Relación de aspecto	1,16	8,83	1,85
Skewness (asimetría)	0	0,85	0,23
Ortogonalidad	0,15	1,00	0,77

Resultados del modelo propuesto

A continuación, se presentan los residuales de la simulación en la Figura 3-14 conservándose en valores del orden de 10^{-1} y 10^{-4} .

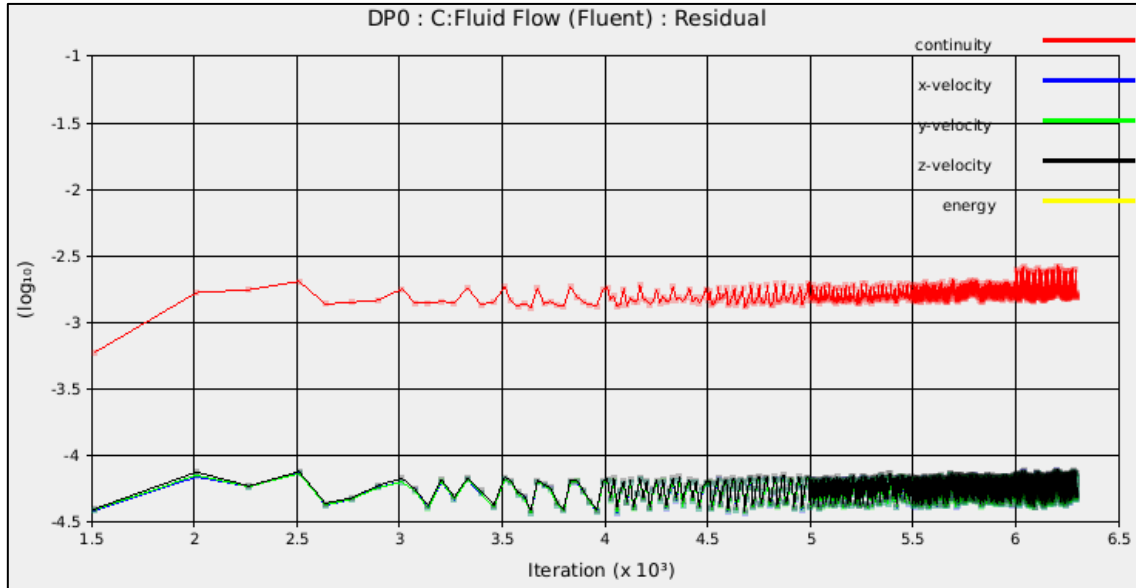


Figura 3-14 Residuales de simulación Tanque propuesto

La estabilización de la concentración de salida en (mg/l) se logró a partir de 1620 segundos (27 minutos) y 5400 iteraciones, donde se mantiene alrededor de **89 mg/l** que representa un **60,6 %** de la concentración de **146,8 mg/l** obtenida en el modelo de validación inicial. Figura X.

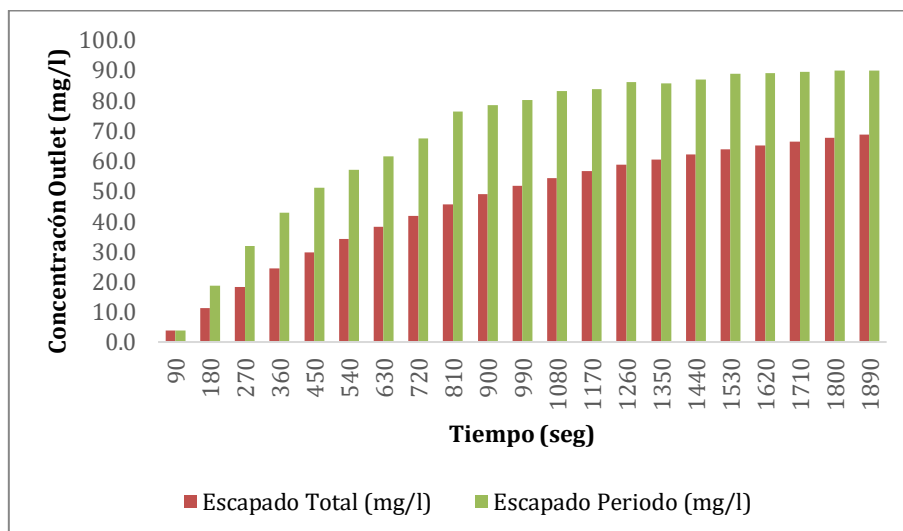


Figura 3-15 Estabilización de estabilización Tanque propuesto

El nuevo tiempo de retención promedio de las partículas que escapan del tanque luego del rediseño de la configuración y dimensiones de los internos es **355,2 segundos**.

Los resultados de perfiles de flujo mostrados en las Figura 3-16, Figura 3-17, Figura 3-18, Figura 3-19, Figura 3-20 y Figura 3-21 indican que el comportamiento de las partículas de la fase secundaria (petróleo) y los perfiles del flujo cambiaron significativamente al cambiar los internos del tanque y disminuir la velocidad de flujo retardando el arribo de las partículas a la zona de descarga de agua.

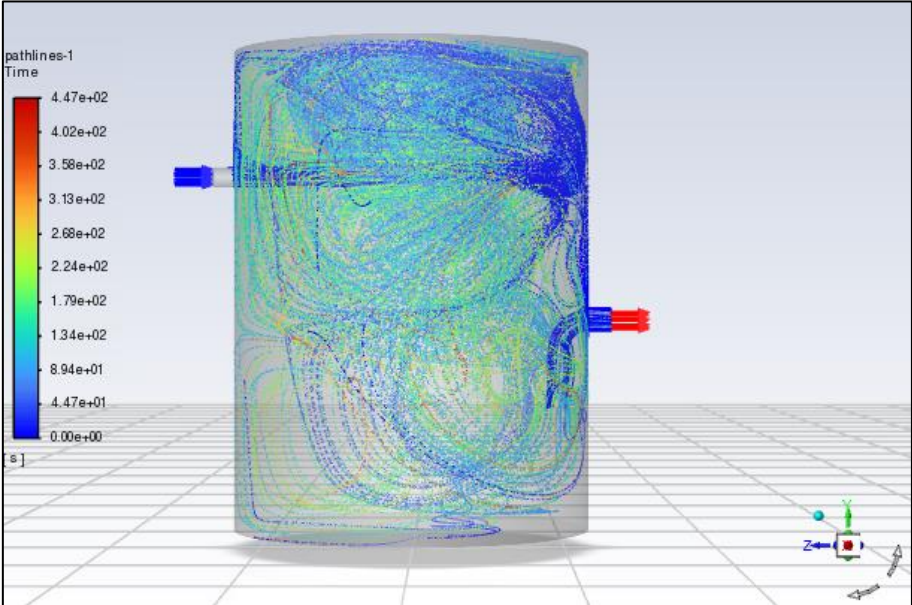


Figura 3-16 Vista Y-Z trayecto de partículas de petróleo Tanque propuesto

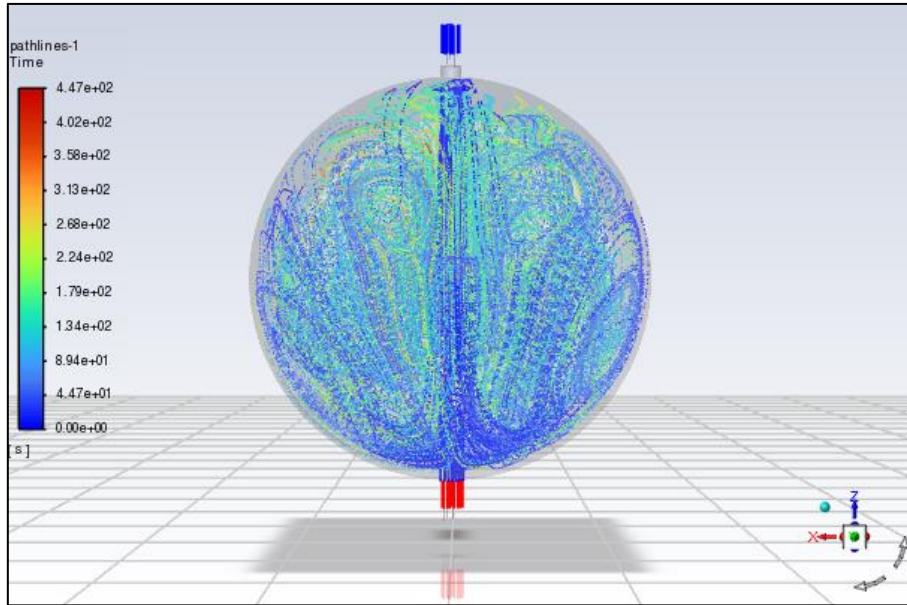


Figura 3-17 Vista de planta trayecto de partículas de petróleo Tanque propuesto

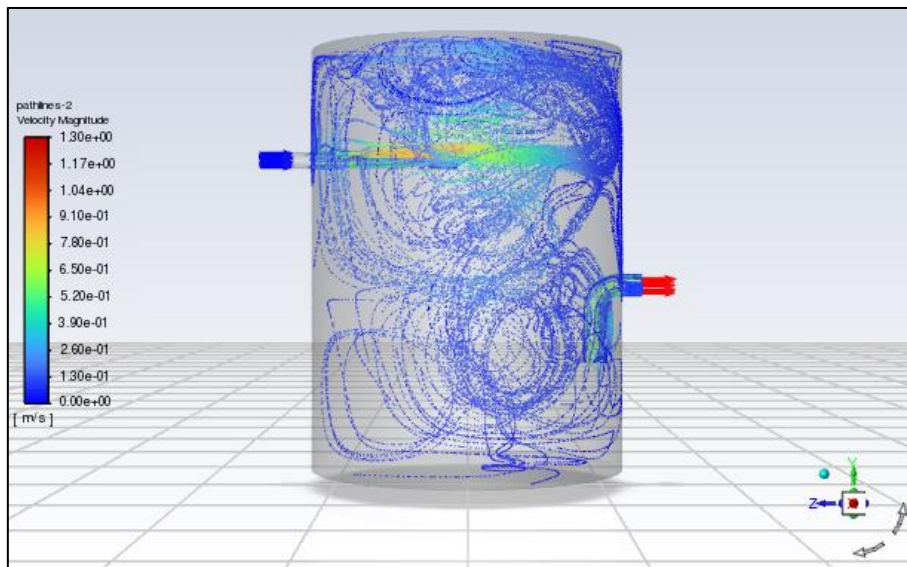


Figura 3-18 Vista Y-Z líneas de flujo de velocidad Tanque propuesto

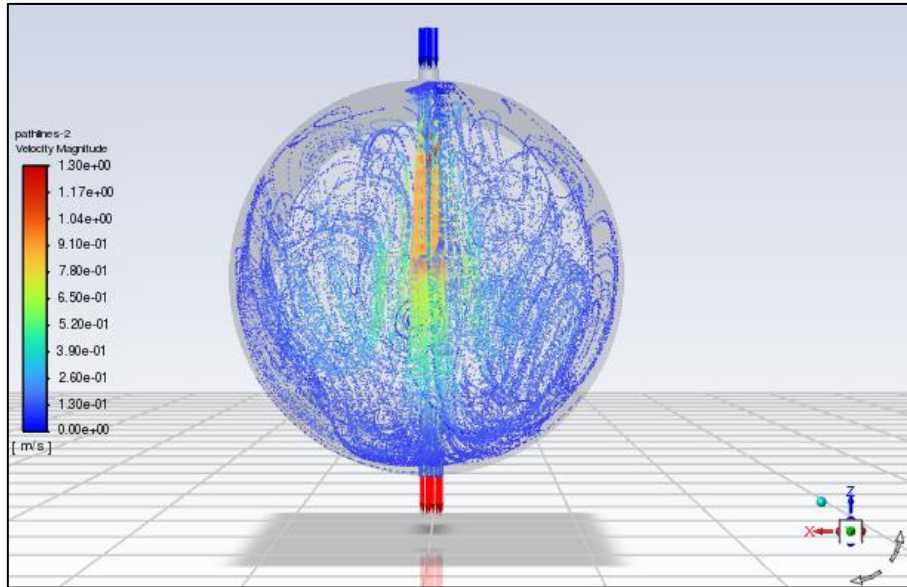


Figura 3-19 Vista de planta líneas de flujo de velocidad Tanque propuesto

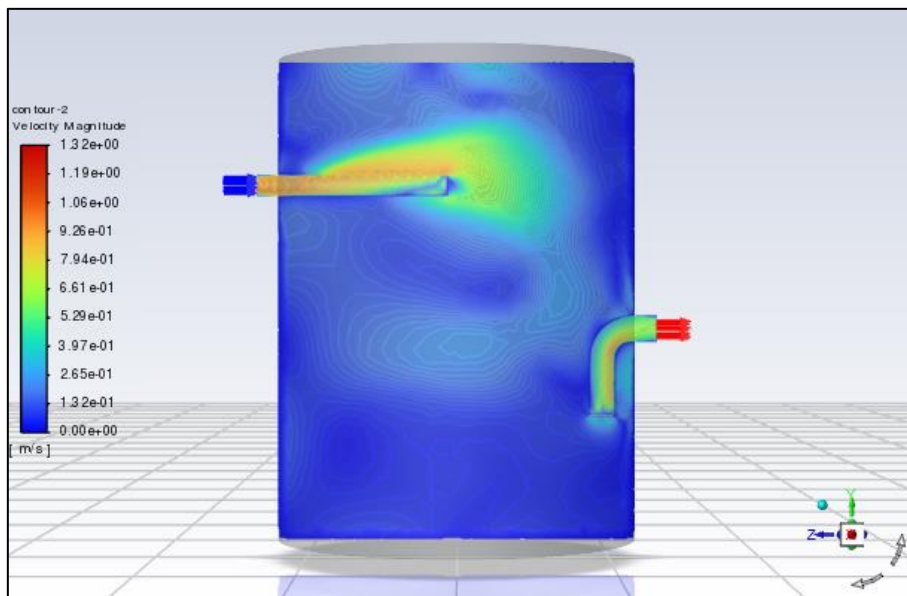


Figura 3-20 Vista Y-Z Contorno de velocidad (inlet y outlet) Tanque propuesto

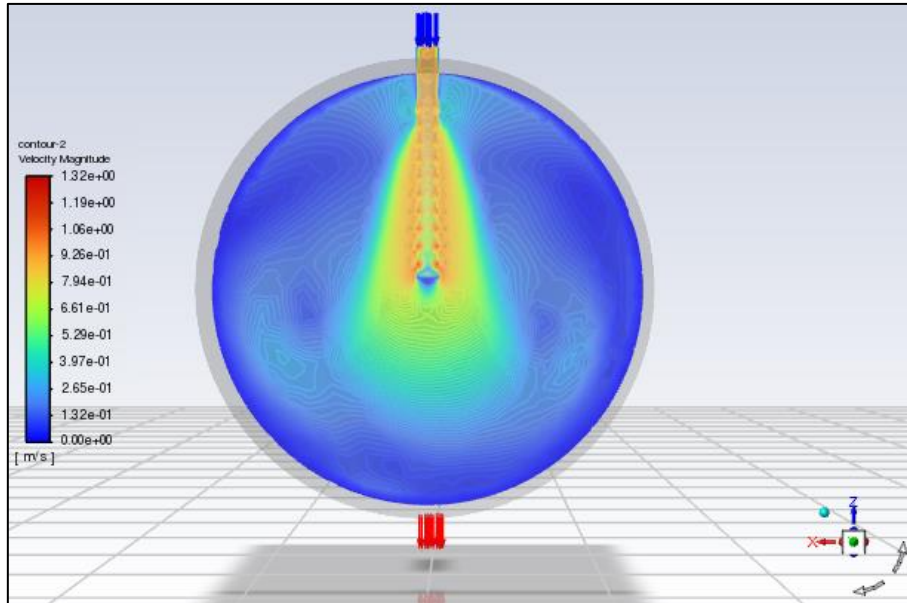


Figura 3-21 Vista de planta Contorno de velocidad (inlet) Tanque propuesto

La eficiencia de separación calculada es la siguiente:

$$Eff_{sep} = \frac{M_{in} - M_{out}}{M_{in}}$$

$$Eff_{sep} = \frac{1,26 - 0,238}{1,26} \times 100 = \mathbf{81,11\%}$$

CONCLUSIONES

En este estudio se desarrolló un modelo de simulación CFD capaz de reproducir el comportamiento dinámico de un tanque real de tratamiento de agua de producción para luego aplicar un rediseño de sus dispositivos internos y optimizar su eficiencia de separación, tal como se puede observar en la siguiente tabla comparativa entre los resultados de simulación del tanque actual y el tanque propuesto:

Parámetro	Tanque actual	Tanque propuesto	Variación
Concentración de petróleo en la descarga (ppm – mg/l)	146,5 – 146,8	83,64 – 89,82	- 42,91%
Tiempo de retención promedio de las partículas de petróleo escapadas (seg)	344,4	355,2	+ 3,14%
Eficiencia de separación (%)	70,95	81,11	+ 10,16%

Para efectuar la simulación, se realizó un modelo 3D adecuado para un análisis eficiente del flujo y proceso de separación en el interior del tanque desnatador.

Al dominio geométrico se aplicó un mallado con un esquema no estructurado tetrahédrico, a partir de la cual se logró la independencia con una malla de 202442 elementos y 39238 nodos con valores de residuales alrededor de 10^{-4} y 10^{-5} para todas las ecuaciones de continuidad, velocidad por cada eje y las variables del modelo de turbulencia $k - \varepsilon$.

El modelo desarrollado logró simular el proceso de separación de la fase continua (agua de producción) y la fase dispersa (partículas de petróleo) incluyendo los fenómenos físicos de turbulencia, colisiones y coalescencia de partículas.

La simulación numérica del modelo del tanque actual obtuvo un error relativo de la concentración de salida de petróleo simulada respecto a la registrada por los análisis de laboratorio fue 2,44 %, de esta manera se concluye que el modelo fue capaz de reproducir el desempeño del tanque desnatador.

Una vez que se logró la validación del modelo del tanque actual y a partir de sus resultados de perfiles de velocidad, líneas de flujo y parámetros de la simulación DPM. Fue posible rediseñar los accesorios o dispositivos internos incrementando el diámetro de las boquillas de ingreso y descarga, logrando disminuir la velocidad en el interior del tanque. Colocar un difusor para obtener una distribución uniforme del fluido y un colector de salida con una rejilla que evitó turbulencias en la descarga del flujo. Para finalmente obtener un incremento del tiempo de retención de las partículas y consecuentemente una mejora en la separación.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- ANSYS Inc. (14 de Octubre de 2013). *ANSYS Fluent Theory Guide*. Canonsburg. Obtenido de Ansys Fluent: <https://www.ansys.com/products/fluids/ansys-fluent>
- Arnold, K., & Stewart, M. (2008). *Surface Production Operations Design of Oil Handling Systems and Facil.* The United States of America: Gulf Professional Publishing.
- Bakker, A. (2005). *Applied Computational Fluid Dynamics*.
- Fernandez Oro, J. M. (2012). *Técnicas numéricas en ingeniería de fluidos*. Barcelona: Reverté.
- Gente Oil Ecuador Pte. Ltd. (2022). *Ingeniería de Facilidades y Mantenimiento*. Quito.
- Ghaffarkhah, A., Ameri Shahrabi, M., & Keshavarz Moraveji, M. (2018). 3D Computational-Fluid-Dynamics Modeling of Horizontal Three-Phase Separators: An Approach for Estimating the Optimal Dimensions. *SPE Production & Operations*, 1-17.
- Kharoua, N., & Khezzer, L. (2012). Application of CFD to Debottleneck Production Separators in a Major Oil. *e SPE Annual Technical Conference and Exhibition held in San Antonio, Texas, USA*, 1-13.
- Kharoua, N., & Khezzer, L. (2012). Using CFD to Model the Performance of Retrofit Production Separators in Abu Dhabi. *American Journal of Fluid Dynamics*, 1-9.
- Lee, C.-M., & Frankiewicz, T. (2005). The Design of large Diameter Skim Tanks Using Computational Fluid Dynamics (CF'D) For Maximum Oil Removal. *15ft Annual Produced Water Seminar, Hilton NASA Clear Lake, Houston, Texas 72058*, 1-16.
- McCleney, A., Green, S., & Owston, R. (2015). Validation of Multiphase Modeling of a Horizontal Liquid-Liquid Separator in Fluent and STAR-CCM+. *Offshore Technology Conference Rio de Janeiro*, 1-16.
- Pourahmadi, L., & Svrcek, W. (2012). Computational Fluid Dynamics-Based Study of an Oilfield Separator Part I: A Realistic Simulation. *Society of Petroleum Engineers*, 1-12.
- Rodríguez, F., & Chugchilán, S. (2016).
- Rosin, P., & Rammler, E. (1933). *The law governing the fineness of powdered coal*.
- Sayma, A. (2009). *Computational Fluid Dynamics*. Ventus Publishing ApS.
- SIMSCALE. (Noviembre de 2020). Obtenido de SimScale CAE Forum: <https://www.simscale.com/forum/t/what-is-y-yplus/82394>
- Straw, Aglave, & Piccioli. (2021). Integrated Approach to Multiphase Flow Regime Prediction Through. *Computational Fluid Dynamics CFD*.
- Versteeg, H., & Malalasekera, W. (2007). *An Introduction to Computational Dynamics The Finite Volume Method*. Harlow: Pearson Education Limited.
- Vilagines, R., & Akhras, A. R. (2010). Three-Phase Flows Simulation for Improving Design of Gravity Separation Vessels. *SPE Annual Technical Conference and Exhibition held in Florence, Italy*, 1-11.
- Zamora, M. (2016). Simulación numérica de la inyección de gas en columnas de flujo oscilatorio. *Universidad Politécnica de Cartagena*.

Anexo 2: Seguimiento diario de control de fluidos (Gente Oil Ecuador Pte. Ltd, 2022)

FECHA	INGRESO V-400			SALIDA V-400			SALIDA V-401			DESCARGA V-400		DESCARGA V-401		T-400		INGRESO SINGUE A		SALIDA FILTRO F-300 B		T-300 G		POZO INYECTOR	
	% AL	% EMUL	% BSW	% AL	% EMUL	% BSW	% AL	% EMUL	% BSW	ppm OIW	ppm SST	ppm OIW	ppm SST	ppm OIW	ppm SST	ppm OIW	ppm SST	ppm OIW	ppm SST	ppm OIW	ppm SST	ppm OIW	ppm SST
1/10/2022	92	0	92	40	0	40	0,6	0,0	0,6	557	87	0	0	150	79	39	49	0	0	-	-	29	38
2/10/2022	92	0	92	40	0	40	0,6	0,0	0,6	593	83	0	0	163	76	40	45	0	0	-	-	28	36
3/10/2022	92	0	92	40	0	40	0,6	0,0	0,6	590	85	0	0	154	78	37	48	0	0	-	-	29	37
4/10/2022	92	0	92	40	0	40	0,6	0,00	0,6	581	88	0	0	160	75	39	49	0	0	-	-	28	39
5/10/2022	92	0	92	40	0	40	0,6	0,0	0,6	570	84	0	0	174	79	42	45	0	0	-	-	29	38
6/10/2022	92	0	92	41	0	41	0,6	0,0	0,6	590	82	0	0	182	70	49	42	0	0	-	-	28	36
7/10/2022	92	0	92	40	0	40	0,6	0,0	0,6	587	85	0	0	198	79	57	49	0	0	-	-	35	40
8/10/2022	92	0	92	42	0	42	0,6	0,0	0,6	580	86	0	0	224	80	55	52	0	0	-	-	34	43
9/10/2022	92	0	92	40	0	40	0,6	0,0	0,6	576	83	0	0	258	82	58	56	0	0	-	-	33	40
10/10/2022	92	0	92	40	0	40	0,6	0,0	0,6	570	82	0	0	197	78	52	51	0	0	-	-	29	38
11/10/2022	92	0	92	40	0	40	0,6	0,0	0,6	570	82	0	0	197	78	52	51	0	0	-	-	29	38
12/10/2022	92	0	92	40	0	40	0,60	0,0	0,60	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-	-	29	38
13/10/2022	91	0	91	63	0	63	0,70	0,0	0,70	412	95	0	0	180	86	48	43	0	0	-	-	32	35
14/10/2022	92	0	92	60	0	60	0,55	0,0	0,55	488	90	0	0	173	87	55	48	0	0	-	-	34	36
15/10/2022	92	0	92	64	0	64	0,45	0,0	0,45	410	89	0	0	168	86	52	47	0	0	-	-	33	33
16/10/2022	92	0	92	64	0	64	0,50	0,0	0,50	418	85	0	0	175	82	48	43	0	0	-	-	34	32
17/10/2022	92	0	92	40	0	40	0,40	0,0	0,40	320	80	0	0	175	76	42	39	0	0	-	-	31	30
18/10/2022	92	0	92	40	0	40	0,40	0,0	0,40	460	80	0	0	175	76	42	39	0	0	-	-	31	30
19/10/2022	92	0	92	32	0	32	0,60	0,0	0,60	480	86	0	0	146	68	34	36	0	0	-	-	32	34
20/10/2022	92	0	92	36	0	36	0,60	0,0	0,60	512	86	0	0	146	68	34	36	0	0	-	-	32	34
21/10/2022	92	0	92	34	0	34	0,50	0,0	0,50	496	84	0	0	136	70	32	32	0	0	-	-	30	32
22/10/2022	92	0	92	38	0	38	0,60	0,0	0,60	496	84	0	0	136	70	32	32	0	0	-	-	30	32
23/10/2022	92	0	92	40	0	40	0,50	0,0	0,50	458	80	0	0	142	74	34	36	0	0	-	-	32	36
24/10/2022	92	0	92	40	0	40	0,50	0,0	0,50	458	80	0	0	142	74	34	36	0	0	-	-	32	36
25/10/2022	92	0	92	30	0	30	0,50	0,0	0,50	480	80	0	0	136	70	32	34	0	0	-	-	28	32
26/10/2022	92	0	92	38	0	38	0,50	0,0	0,50	480	80	0	0	136	70	32	34	0	0	-	-	28	32
27/10/2022	92	0	92	40	0	40	0,50	0,0	0,50	480	80	0	0	136	70	32	34	0	0	-	-	30	34
27-oct-22	92	0	92	40	0	40	0,50	0,00	0,50	480	80	0	0	136	70	32	34	0	0	-	-	30	34

Anexo 3: Validación de modelo Caso validación

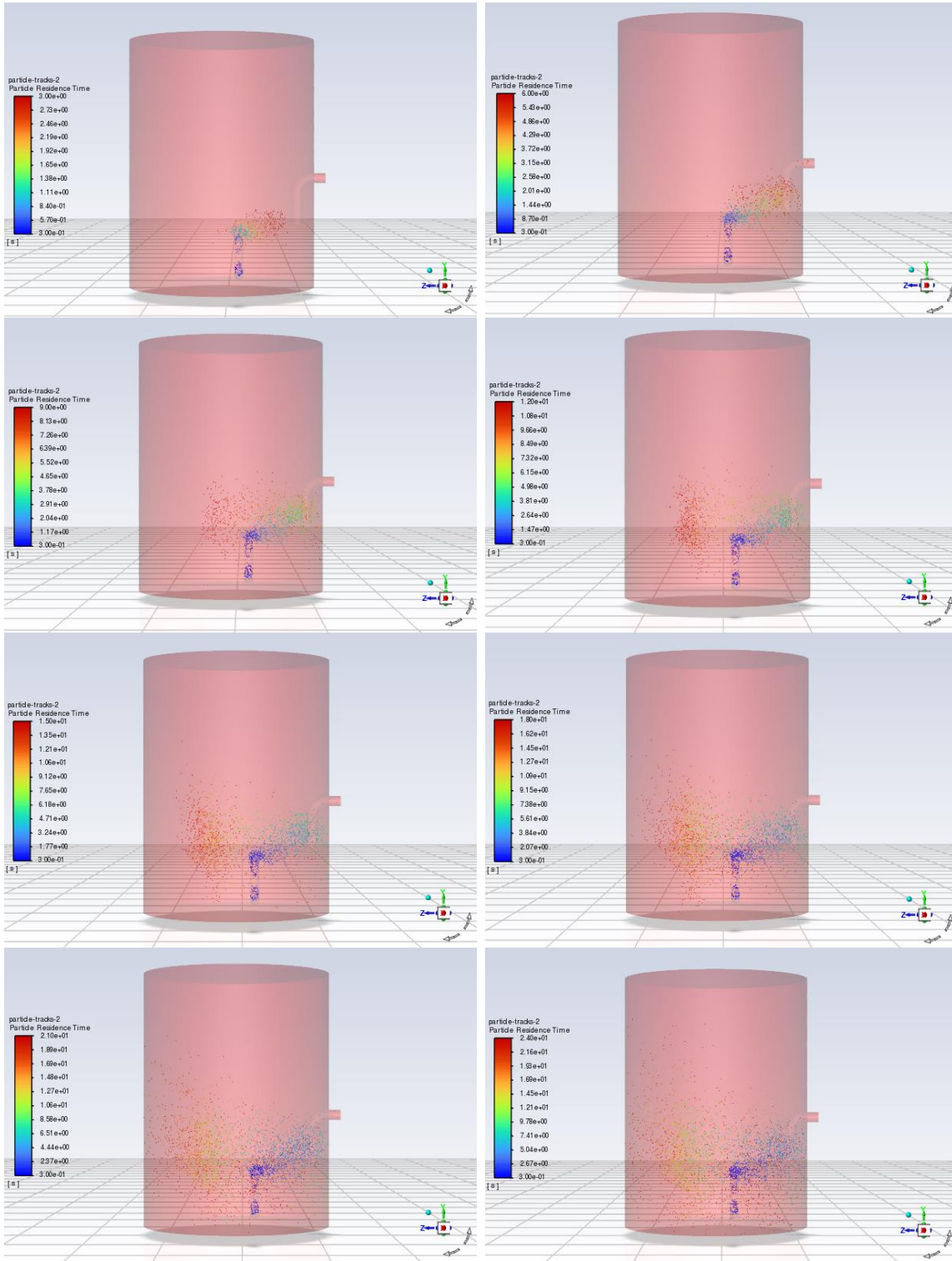
DATOS DE GENTE OIL ECUADOR

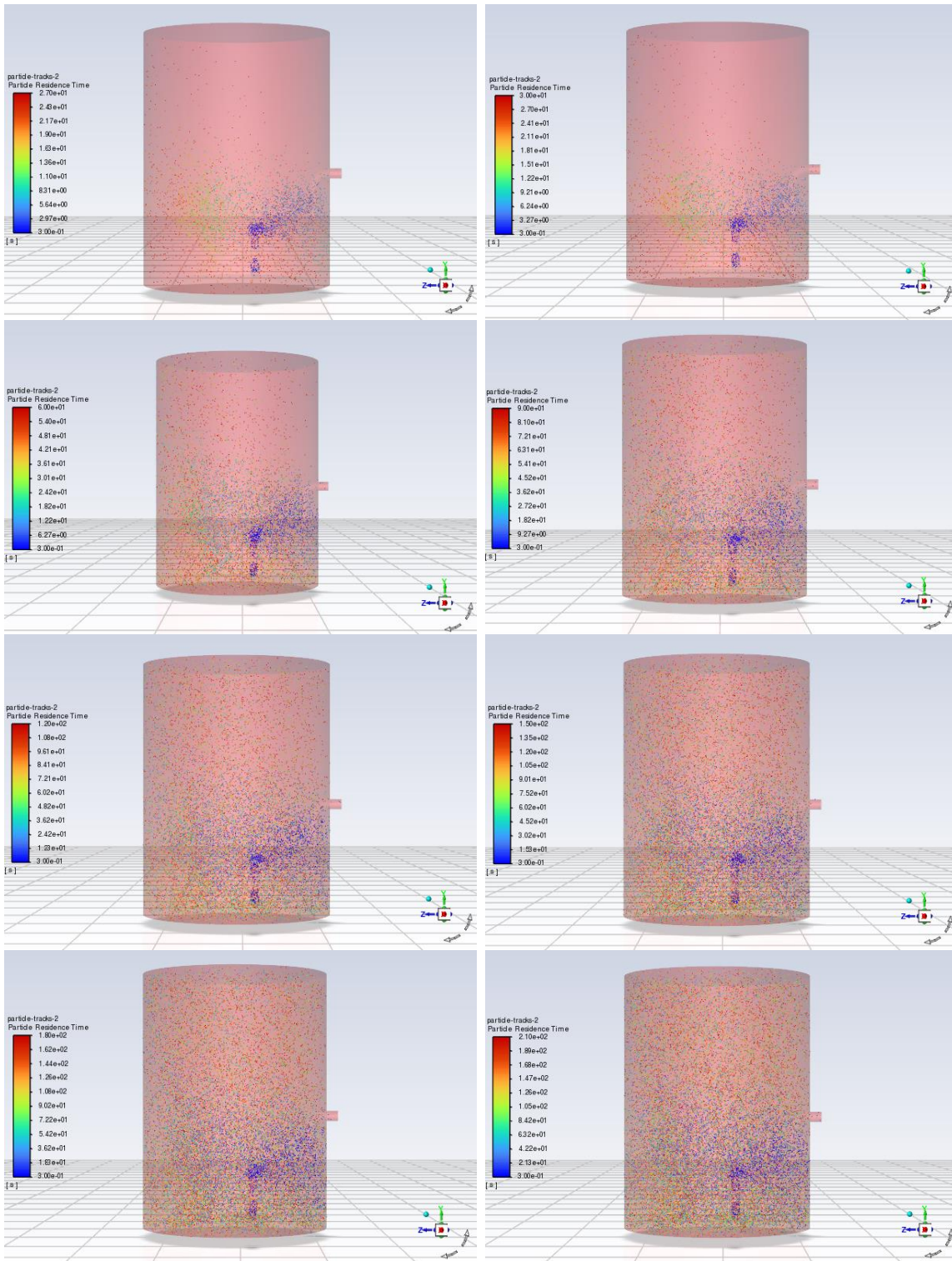
Caudal (bpd)	16000
Modelo	k-e SCL
Inlet (mg/l)	481
Outlet (mg/l)	143,3

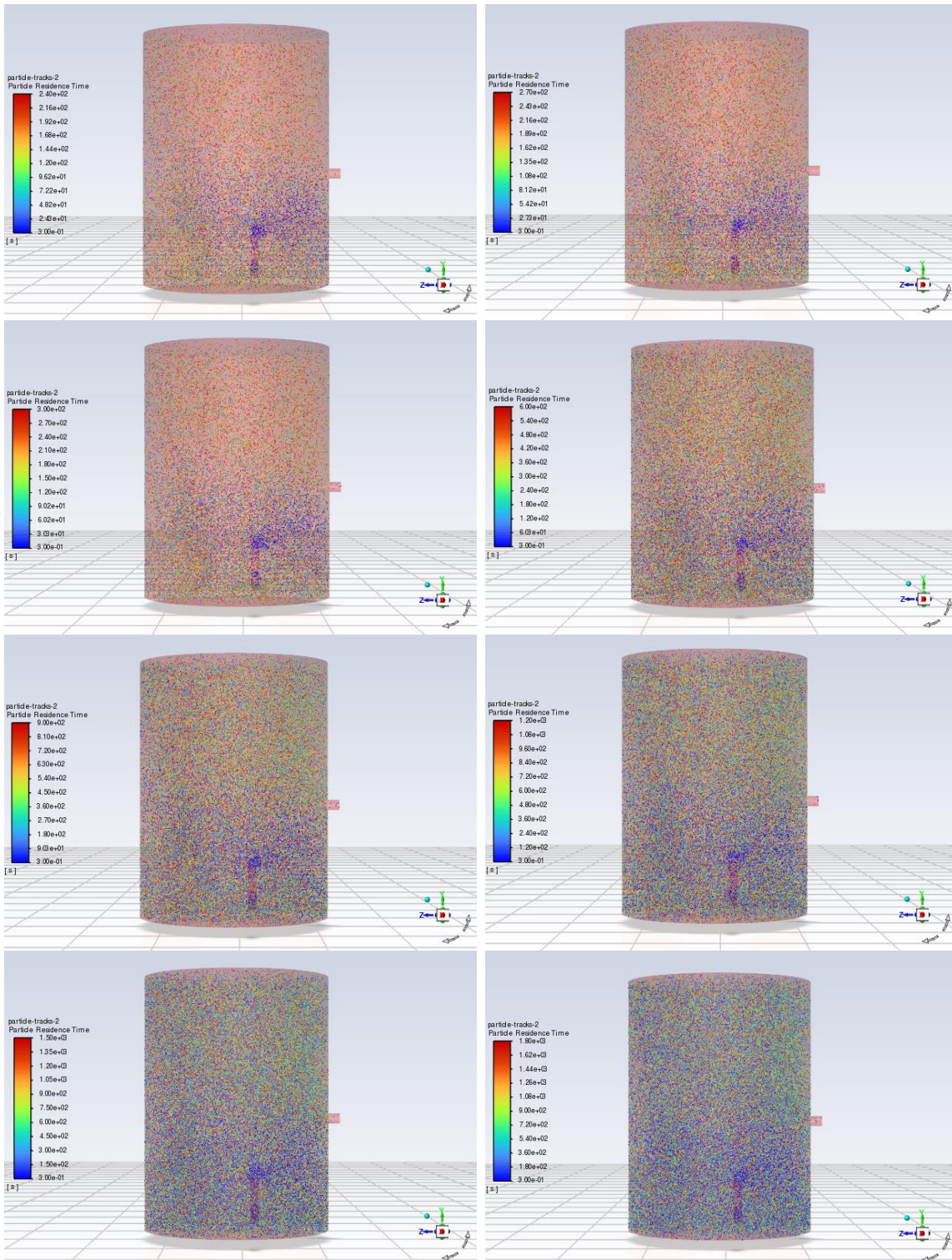
DATOS DE SIMULACIÓN

T Inyección (s)	90,00	180,00	270,00	360,00	447,00	540,00	630,00	720,00	810,00	900,00	990,00	1065,00	1170,00	1260,00	1350,00	1440,00	1530,00	1620,00	1710,00	1800,00	1890,00
T Total (s)	90,00	180,00	270,00	360,00	447,00	540,00	630,00	720,00	810,00	900,00	990,00	1065,00	1170,00	1260,00	1350,00	1440,00	1530,00	1620,00	1710,00	1800,00	1890,00
T Periodo (s)	90,00	90,00	90,00	90,00	90,00	90,00	90,00	90,00	90,00	90,00	90,00	75,00	105,00	90,00	90,00	90,00	90,00	90,00	90,00	90,00	90,00
Masa Inyección (kg)	1,26	2,52	3,78	5,04	6,26	7,56	8,82	10,08	11,34	12,60	13,86	14,91	16,38	17,64	18,90	20,16	21,42	22,68	23,94	25,20	26,46
Masa Inyección Periodo (kg)	1,26	1,26	1,26	1,26	1,22	1,30	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,05	1,47	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26
Masa Escapada (kg)	0,08	0,19	0,34	0,52	0,71	0,93	1,17	1,43	1,70	2,00	2,30	2,57	2,95	3,29	3,64	3,99	4,35	4,72	5,10	5,49	5,88
Masa Esc Periodo (kg)	0,08	0,12	0,15	0,17	0,20	0,22	0,24	0,26	0,28	0,29	0,30	0,26	0,38	0,34	0,35	0,36	0,36	0,37	0,38	0,39	0,39
Masa Atrapada (kg)	0,01	0,09	0,23	0,42	0,67	0,99	1,34	1,74	2,17	2,64	3,13	3,58	4,21	4,79	5,37	6,02	6,66	7,31	7,98	8,67	9,36
Masa Atrap Periodo (kg)	0,01	0,08	0,14	0,20	0,25	0,31	0,35	0,40	0,43	0,47	0,50	0,44	0,64	0,58	0,58	0,65	0,64	0,65	0,67	0,68	0,70
Masa en fluido (kg)	1,17	2,24	3,21	4,10	4,88	5,64	6,32	6,92	7,47	7,97	8,43	8,77	9,23	9,57	9,92	10,15	10,41	10,65	10,86	11,04	11,22
% Total	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
% Escapado	0,06	0,08	0,09	0,10	0,11	0,12	0,13	0,14	0,15	0,16	0,17	0,17	0,18	0,19	0,19	0,20	0,20	0,21	0,21	0,22	0,22
% Escapado Periodo	0,06	0,09	0,12	0,14	0,16	0,17	0,19	0,20	0,22	0,23	0,24	0,25	0,26	0,27	0,28	0,28	0,28	0,30	0,30	0,31	0,31
% Atrapado	0,01	0,03	0,06	0,08	0,11	0,13	0,15	0,17	0,19	0,21	0,23	0,24	0,26	0,27	0,28	0,30	0,31	0,32	0,33	0,34	0,35
Escapado Total (kg/s)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Escapado Periodo (kg/s)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Escapado Total (mg/l)	29,06	36,42	42,95	48,68	54,25	58,66	63,08	67,32	71,45	75,40	78,94	81,80	85,58	88,61	91,45	94,11	96,54	98,98	101,38	103,61	105,67
Escapado Periodo (mg/l)	29,06	43,78	56,00	65,89	74,72	82,50	89,59	96,99	104,54	110,95	114,35	119,56	123,89	127,93	131,33	133,97	135,48	140,39	144,54	146,05	146,80
Error (%)	0,80	0,69	0,61	0,54	0,48	0,42	0,37	0,32	0,27	0,23	0,20	0,17	0,14	0,11	0,08	0,07	0,05	0,02	-0,01	-0,02	-0,02

Anexo 4: Tiempo de residencia de partículas (Caso – Validación)







Anexo 5: Validación de modelo Tanque propuesto

Caudal (bpd)	16000
Modelo	k-e SCL
Ingreso (mg/l)	481

Prueba

	DATOS SIMULACIÓN																				
	90	180	270	360	450	540	630	720	810	900	990	1080	1170	1260	1350	1440	1530	1620	1710	1800	1890
T Total (s)	90,00	90,00	90,00	90,00	90,00	90,00	90,00	90,00	90,00	90,00	90,00	90,00	90,00	90,00	90,00	90,00	90,00	90,00	90,00	90,00	90,00
T Periodo (s)	90,00	90,00	90,00	90,00	90,00	90,00	90,00	90,00	90,00	90,00	90,00	90,00	90,00	90,00	90,00	90,00	90,00	90,00	90,00	90,00	90,00
Masa Inyección (kg)	1,26	2,52	3,78	5,04	6,30	7,56	8,82	10,08	11,34	12,60	13,86	15,12	16,38	17,64	18,90	20,16	21,42	22,68	23,94	25,20	26,46
Masa Inyección Periodo (kg)	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26
Masa Escapada (kg)	0,00	0,04	0,11	0,22	0,36	0,52	0,70	0,89	1,09	1,30	1,51	1,73	1,95	2,18	2,40	2,63	2,87	3,11	3,34	3,58	3,82
Masa Esc Periodo (kg)	0,00	0,04	0,07	0,11	0,14	0,16	0,18	0,19	0,20	0,21	0,21	0,22	0,22	0,23	0,23	0,23	0,24	0,24	0,24	0,24	0,24
Masa Atrapada (kg)	0,16	0,69	1,30	2,01	2,71	3,41	4,47	5,37	6,29	7,23	8,19	9,16	10,14	11,13	12,12	13,12	14,12	15,13	16,13	17,15	18,15
Masa Atrap Periodo (kg)	0,16	0,53	1,30	0,70	2,71	0,70	4,47	0,90	0,93	0,94	0,95	0,97	0,98	0,99	0,99	1,00	1,00	1,01	1,00	1,02	1,00
Masa en fluido (kg)	1,10	1,80	2,37	2,82	3,26	3,71	3,66	3,83	3,96	4,07	4,17	4,23	4,29	4,34	4,38	4,41	4,43	4,45	4,47	4,47	4,49
% Total	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,01	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
% Escapado	0,00	0,01	0,03	0,04	0,06	0,07	0,08	0,09	0,10	0,10	0,11	0,11	0,12	0,12	0,13	0,13	0,13	0,14	0,14	0,14	0,14
% Escapado Periodo	0,00	0,03	0,06	0,09	0,11	0,13	0,14	0,15	0,16	0,17	0,17	0,17	0,18	0,18	0,18	0,18	0,19	0,19	0,19	0,19	0,19
% Atrapado	0,13	0,27	0,34	0,40	0,43	0,45	0,51	0,53	0,55	0,57	0,59	0,61	0,62	0,63	0,64	0,65	0,66	0,67	0,67	0,68	0,69
Escapado Total (kg/s)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Escapado Periodo (kg/s)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Escapado Total (mg/l)	0,00	6,60	13,71	20,76	26,95	32,64	37,47	41,75	45,58	48,87	51,70	54,31	56,58	58,68	60,48	62,13	63,69	65,10	66,38	67,55	68,61
Escapado Periodo (mg/l)	0,00	13,21	27,93	41,89	51,70	61,14	66,42	71,70	76,23	78,50	80,01	83,03	83,78	86,04	85,67	86,80	88,69	89,06	89,44	89,82	89,82

Anexo 4: Tiempo de residencia de partículas (Tanque propuesto)

