

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

**FACULTAD DE INGENIERÍA EN GEOLOGÍA Y
PETRÓLEOS**

**VALIDACIÓN DE UN MODELO NUMÉRICO DE SIMULACIÓN DE
FLUJO DENTRO DEL PROCESO DE DESHIDRATACIÓN EN
TANQUES DE LAVADO MEDIANTE CFD**

**TRABAJO DE TITULACIÓN PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE
INGENIERO EN PETRÓLEOS**

**GIL POTES LUIS MIGUEL
luis.gil@epn.edu.ec**

**DIRECTOR: Ing. HIDALGO DÍAZ VICTOR HUGO, D.Sc.
victor.hidalgo@epn.edu.ec**

Quito, Agosto de 2020

CERTIFICACIÓN

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por Luis Miguel Gil Potes, bajo mi supervisión.

Ing. Hidalgo Díaz Victor Hugo, D.Sc.
DIRECTOR DEL TRABAJO

DECLARACIÓN

Yo, **Luis Miguel Gil Potes**, 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.

Luis Miguel Gil Potes

DEDICATORIA

A mi madre, el único ser humano que me ama más de lo que yo jamás podría.

AGRADECIMIENTOS

A mis padres, Carlos Julio y Adriana, que trabajan sin descanso desde que tengo memoria para asegurarse de que nunca pase por ninguna necesidad.

A mis hermanos José Daniel y Luis Darío, por su permanente apoyo y presión para ayudarme a lograr esta meta.

A mi tía Patrícia, mi abuelo Enrique y mi abuela Isabel, que siempre están pendientes de mí y me regalan su amor sin importar qué.

A mi más grande amigo de la universidad Joshua, que nunca me ha hecho de menos y siempre me ha apoyado a pesar de todos mis defectos.

A las hermanas de Fátima que me recibieron en su hogar y me dieron un lugar importante en sus oraciones.

A mis compañeros de clase y a mis amigos

Euclides, Bladimir y Johanna, que me han enseñado tantas cosas y me han tenido paciencia.

A Stalyn, Victor Hugo, José Luis y Jaime, ya que sin su ayuda jamás hubiera culminado este proyecto ni hubiera logrado la meta de ser ingeniero.

A los profesores y autoridades de mi facultad, que así me fuera bien o mal siempre me han tenido en buen concepto y me han dado las herramientas para avanzar en mi carrera.

A la poderosa Escuela Politécnica Nacional.

ÍNDICE DE CONTENIDO

CERTIFICACIÓN.....	i
DECLARACIÓN.....	ii
DEDICATORIA.....	iii
AGRADECIMIENTOS.....	iv
ÍNDICE DE FIGURAS.....	ix
ÍNDICE DE TABLAS.....	xi
RESUMEN.....	xii
ABSTRACT.....	xiii
INTRODUCCIÓN.....	1
Objeto de estudio.....	2
Alcance.....	3
Objetivo general.....	3
Objetivos Específicos.....	3
1 MARCO TEÓRICO Y CONCEPTUAL.....	4
1.1 Producción de hidrocarburos en el Ecuador.....	4
1.2 Tratamiento de producción.....	4
1.2.1 Deshidratación del crudo.....	5
1.2.2 Diseño de tanques.....	6
1.3 Emulsiones.....	7
1.3.1 Principios de rompimiento de emulsiones.....	8
1.4 Dinámica de fluidos.....	9
1.4.1 Número de Reynolds.....	10
1.4.2 Regímenes de flujo.....	10
1.4.3 Descripción del movimiento de los fluidos.....	12
1.4.4 Principio de continuidad.....	13

1.4.5 Principio de conservación de movimiento lineal.....	14
1.4.6 Principio de conservación de la energía.....	14
1.5 Simulación numérica	15
1.5.1 CFD	15
2 METODOLOGÍA	20
2.1 Módulo estructural.....	22
2.1.1 Diseño geométrico	22
2.1.2 Generación de malla	31
2.2 Módulo de flujo	36
2.2.1 Flujo en el modelo optimizado.....	36
2.2.2 Modelo de flujo en CFX	39
2.3 Módulo de CFD.....	46
2.3.1 Procesamiento.....	46
2.3.2 Post-procesamiento	47
3 RESULTADOS Y DISCUSIÓN	50
3.1 Simulaciones 2D	50
3.1.1 Independencia de malla 2D	50
3.1.2 Parámetros del caso de estudio	52
3.1.3 Variables residuales	53
3.1.4 Comparación con el modelo optimizado	54
3.1.5 Caracterización y eficiencia	55
3.2 Simulaciones 3D	57
3.2.1 Parámetros del caso de estudio	57
3.2.2 Variables residuales	58
3.2.3 Comparación con simulación 2D	58
3.2.4 Capacidad	60

3.2.5 Caracterización y eficiencia	60
4 CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS	63
4.1 Conclusiones	63
4.2 Trabajos futuros.....	63
Bibliografía	65
ANEXOS	70

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Mapa del sistema de oleoducto transecuatoriano	4
Figura 2. Esquema de flujo de separación en facilidades de superficie	5
Figura 3. Esquema de separadores gravitacionales.....	6
Figura 4. Esquema de clasificación de emulsiones	7
Figura 5. Fenómeno de coalescencia	9
Figura 6. Líneas de flujo en flujo laminar y turbulento en una tubería.....	11
Figura 7. Cascada de energía en turbulencias	12
Figura 8. Volumen de control de dimensiones finitas para continuidad.....	13
Figura 9. Metodología de CFD	16
Figura 10. Transición de flujo laminar a turbulento.....	17
Figura 11. Esquema de metodología.....	20
Figura 12. Esquema metodológico para obtención del modelo geométrico.....	22
Figura 13. Esquema bidimensional de medio tanque.....	23
Figura 14. Esquema del tanque descrito (vista lateral).....	25
Figura 15. Dimensiones del diseño 2D	27
Figura 16. Vista lateral y superior de herramienta de corte para tubería central..	28
Figura 17. Tamaño de los inlets y outlets del diseño 2D.....	28
Figura 18. Diseño tridimensional	29
Figura 19. Pulling del modelo 2D para obtener el 3D	29
Figura 20. Entrada de fluido en el modelo 3D.....	30
Figura 21. Salda de petróleo del modelo 3D	30
Figura 22. Metodología de obtención de mallado	31
Figura 23. Vista frontal del mallado del diseño 2D	32
Figura 24. Detalles de <i>inflation</i> del mallado del diseño 2D.....	33
Figura 25. Vista inclinada del mallado del diseño 3D	34
Figura 26. Detalles del mallado 3D	35
Figura 27. Metodología de obtención de condiciones de flujo.....	36
Figura 28. Puntos y condiciones de borde en el <i>setup</i>	42
Figura 29. Desarrollo de CFX para simulación de tanque.....	46
Figura 30. Metodología de validación de resultados	50
Figura 31. Variables residuales de simulación 2D.....	53

Figura 32. Perfil del tanque en [3] vs perfil + vectores de simulaciones 2D	54
Figura 33. Renderización de volumen de petróleo de simulaciones 2D	55
Figura 34. Renderización de volumen agua de simulaciones 2D	56
Figura 35. Isovolumen de la fracción volumétrica de agua por encima del 0.1%. 56	
Figura 36. Variables residuales de la simulación con malla de 0.027 [m].....	58
Figura 37. Perfil 3D de [3] comparado a la renderización de petróleo en 3D.....	59
Figura 38. Comparación de turbulencia entre simulaciones 2D y 3D.....	60
Figura 39. Renderización de volumen de petróleo en 3D	61
Figura 40. Renderización de volumen de agua en 3D	61
Figura 41. Isovolúmenes de petróleo y agua en la simulación 3D a 2 m/s	62
figura 42. Dimensiones digitales para el diseño	70
Figura 43. Velocidad de entrada superior a los 0.2 m/s.....	84
Figura 44. Velocidad de entrada inferior a los 0.2 m/s.....	84
Figura 45. Turbulencia con el nivel de interfase por encima de entrada	85
Figura 46. Turbulencia con el nivel de interfase por debajo de entrada	85
Figura 47. Trayectoria en simulaciones 2D	87
Figura 48. Trayectoria del flujo de partículas en el diseño 2D	87
Figura 49. Isovolumen de petróleo en simulación 3D.....	88
Figura 50. Contorno de velocidades en simulación 3D.....	88
Figura 51. Contorno de velocidad de flujo en 3D + vectores.....	89
Figura 52. Trayectoria del flujo de partículas en el diseño 3D.....	89

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Reglamentos estandarizados de diseño de tanques	6
Tabla 2. Descripción de regímenes de flujo.....	10
Tabla 3. Enfoques para describir el movimiento de los fluidos	12
Tabla 4. Tipos de mallados	17
Tabla 5. Descripción de criterios de convergencia	19
Tabla 6. Proporciones del diseño con respecto a la altura.....	24
Tabla 7. Proporciones del diseño con respecto al radio	24
Tabla 8. Fragmento del apéndice A1-b de la API650 para medidas de tanques..	26
Tabla 9. Dimensiones del tanque	27
Tabla 10. Cambios en configuración en <i>meshing</i> para mallado del modelo 2D...	32
Tabla 11. Cambios en configuración en <i>meshing</i> para mallado del modelo 3D...	34
Tabla 12. Condiciones de operación para el modelo optimizado.....	37
Tabla 13. Tipos de análisis utilizados	39
Tabla 14. Propiedades del petróleo para CFX	40
Tabla 15. Parámetros de dominio de flujo	40
Tabla 16. Condiciones de borde.....	41
Tabla 17. Definiciones adicionales (Puntos Fuente).....	42
Tabla 18. Control de solución.....	43
Tabla 19. Expresiones utilizadas	43
Tabla 20. Velocidades requeridas en diseño 2D por las condiciones de [3]	44
Tabla 21. Velocidades propuestas para diseño 2D	44
Tabla 22. Velocidades requeridas en diseño 3D por las condiciones de [3]	44
Tabla 23. Velocidades propuestas para diseño 3D	45
Tabla 24. Criterios de calidad de una malla.....	47
Tabla 25. Comportamiento en simulaciones 2D	48
Tabla 26. Comportamiento en simulaciones 3D	49
Tabla 27. Fracción volumétrica de petróleo para independencia de malla	51
Tabla 28. Presión absoluta en tanque para independencia de malla	52
Tabla 29. Parámetros de mallas utilizadas en simulaciones 2D	52
Tabla 30. Parámetros de mallas utilizadas en simulaciones 3D	57

RESUMEN

Se realizó un estudio numérico de flujo bifásico en tanques deshidratadores con platos coalescentes con el objetivo de validar el modelo numérico utilizado por Gonzalo Mognol para su optimización de diseño de tanque en su artículo: “Optimización de tanques de separación de agua libre mediante CFD”. Utilizando dinámica de fluidos computacional (CFD) se obtuvo una metodología para evaluar separación de fases en el flujo dentro de dichos tanques. El estudio se realizó con simulaciones empleando el software ANSYS CFX en sus componentes Spaceclaim, Meshing, Pre, Solver y Post utilizando el modelo K- ω SST de turbulencia junto a la replicación de condiciones de flujo originales del diseño optimizado. Los resultados fueron validados mediante la replicación de comportamiento de flujo en las geometrías propuestas junto a la calidad de malla utilizada. Además, los resultados muestran la caracterización del funcionamiento de los platos con respecto al flujo y su función coalescente de partículas dispersas.

Palabras clave: Tanques Deshidratadores, ANSYS CFX, CFD, Platos Coalescentes, Flujo Bifásico.

ABSTRACT

This was a numerical study of biphasic Flow in dehydrator tanks with coalescing plates aiming to validate the numerical model used by Gonzalo Mognol for his tank design optimization in the article: "Free Water separation tanks optimization with CFD". Using Computational Fluids Dynamic (CFD) a methodology was obtained to evaluate phase separation in the flow inside such tanks. This study was performed with simulations within ANSYS CFX software and its components Spaceclaim, Meshing, Pre, Solver and Post using the K- ω SST turbulence model along with the replication of original flow conditions proposed in the optimized design. Results were validated due to flow's behavior graphical replication in the proposed geometries along with used mesh quality. Furthermore, these results show the characterization of plates function concerning the flow and its coalescing function for dispersed particles.

Keywords: Dehydrator Tanks, ANSYS CFX, CFD, Coalescing Plates, Biphasic Flow.

INTRODUCCIÓN

En la industria hidrocarburífera existen diversas operaciones necesarias antes de la comercialización del petróleo crudo. En cada una de ellas se utilizan ciertos equipos denominados tanques para almacenar o tratar los fluidos. Los tanques se clasifican de acuerdo con el producto almacenado junto con las presiones que manejan [1].

Al extraer crudo de la roca reservorio viene acompañado de agua o de gas del mismo hidrocarburo, razón por la cual la separación de las fases del petróleo junto con otras sustancias es una parte fundamental de la producción. Los componentes que acompañan a este recurso natural y el estado en el que se encuentra influyen en todas las operaciones en superficie.

Para separar el crudo del agua y del gas se han diseñado múltiples facilidades de superficie con funciones específicas en cada una. Entre estas facilidades están los tanques de lavado que reciben el fluido en una mezcla de petróleo crudo con agua y lo separan mediante la sedimentación gravitacional a causa de la diferencia de densidades entre estos dos fluidos [2].

El diseño de los tanques deshidratadores de crudo en la historia de la industria petrolera ha sido producto de la experiencia de funcionamiento de tanques existentes y conocimientos empíricos [3], ya que se ha implementado parcialmente los recursos computacionales disponibles.

Los avances tecnológicos recientes en la industria se han visto reflejados en múltiples herramientas que se utilizan en diferentes áreas, desde la descripción litológica hasta la medición de flujo en una tubería. En contraste, los equipos de tratamiento de crudo dentro de las estaciones de producción no han mejorado considerablemente a pesar de tener a disposición la dinámica de flujo computacional (CFD).

Objeto de estudio

El trabajo de investigación abarca el diseño de tanques separadores de agua en un contexto de optimización con el propósito de validar un diseño que funcione con mayor eficiencia para trabajar con menores capacidades y ocupar un menor espacio en estación que el de los tanques que se utilizan actualmente en el Ecuador.

Para lograr este propósito, el trabajo se enfoca la obtención de resultados de considerable similitud en el comportamiento del flujo con los de diseños previamente propuestos en el paper “OPTIMIZACIÓN DE TANQUES DE SEPARACIÓN DE AGUA LIBRE MEDIANTE CFD” de Gonzalo Mognol y otros autores en Argentina [3], donde al utilizar CFD (Computational Fluid Dynamics) dentro de Openfoam determinaron que se pueden hacer tanques que cumplen con condiciones operativas de planta al incluir platos de forma cónica en paralelo ubicados verticalmente que afectan el flujo en su interior.

Alcance

El estudio se limita a validar un modelo numérico de flujo de fluidos estudiado y analizado en el artículo de investigación “OPTIMIZACIÓN DE TANQUES DE SEPARACIÓN DE AGUA LIBRE MEDIANTE CFD” publicado por Gonzalo Mognol y otros autores [3].

Objetivo general

Validar el diseño de un tanque de lavado con dimensiones optimizadas mediante la dinámica de fluidos computacional CFD.

Objetivos Específicos

- Obtener la geometría y mallado para la simulación empleando ANSYS y la generación de resultados precisos en la simulación por medio de CFD.
- Obtener una configuración dentro de CFX en ANSYS que pueda ser replicada para nuevos diseños en el futuro.
- Demostrar la eficiencia de la configuración de simulación mediante el análisis de la convergencia de variables al iterar.

1 MARCO TEÓRICO Y CONCEPTUAL

1.1 Producción de hidrocarburos en el Ecuador

En Ecuador durante el año 2019, entre empresas petroleras públicas y privadas, se produjo un total de 193816083 barriles de petróleo, siendo 152858038 barriles extraídos por Petroamazonas E.P. [4] con una producción promedio diaria de 418835 barriles. En la economía ecuatoriana, el valor agregado del petróleo al PIB en el 2019 fue de un valor aproximado de 6658 millones de USD [5] estableciéndose como una parte importante del sistema financiero.

Previo a la comercialización el crudo viaja a través del SOTE como se muestra en la figura 1 partiendo de las estaciones de bombeo que recibe el crudo tratado de las facilidades de superficie de cada estación de producción en la región Amazónica.



Figura 1. Mapa del sistema de oleoducto transecuatoriano (Fuente: [6])

1.2 Tratamiento de producción

El crudo de reservorio viene acompañado de agua y gas en ocasiones emulsionados, en consecuencia, para poder ser transportado y refinado debe ser separado en las facilidades de superficie de la estación de producción como se muestra en la figura 2.

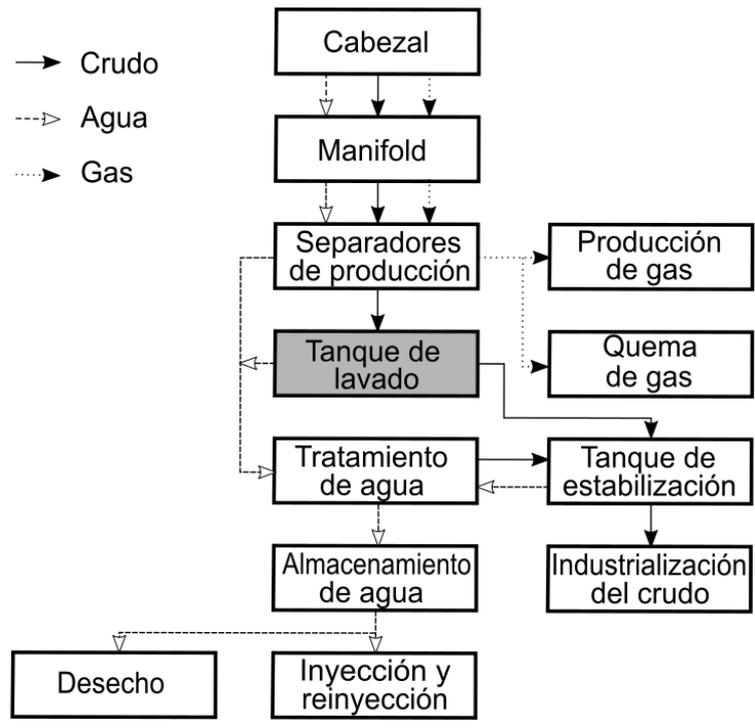


Figura 2. Esquema de flujo de separación en instalaciones de superficie (Fuente: [2])

1.2.1 Deshidratación del crudo

La deshidratación de petróleo crudo sucede en los tanques de lavado y es la separación del agua asociada a este fluido desde el pozo hasta un porcentaje menor al 1% de contenido. El agua puede venir libremente junto al crudo o emulsionada. Para la deshidratación se pueden utilizar separadores gas-líquido, separadores gravitacionales, calentadores y coalescedores electrostáticos [7].

1.2.1.1 Separadores gravitacionales

Los separadores gravitacionales son tanques sedimentadores, *gun barrels*, tanques de lavado y *free water knockout* que separan el agua asociada al crudo producido [7] como se muestra en la figura 3. Son generalmente diseñados con baffles en su interior con el objetivo de facilitar la coalescencia de partículas de agua y ayudar a la desemulsificación.

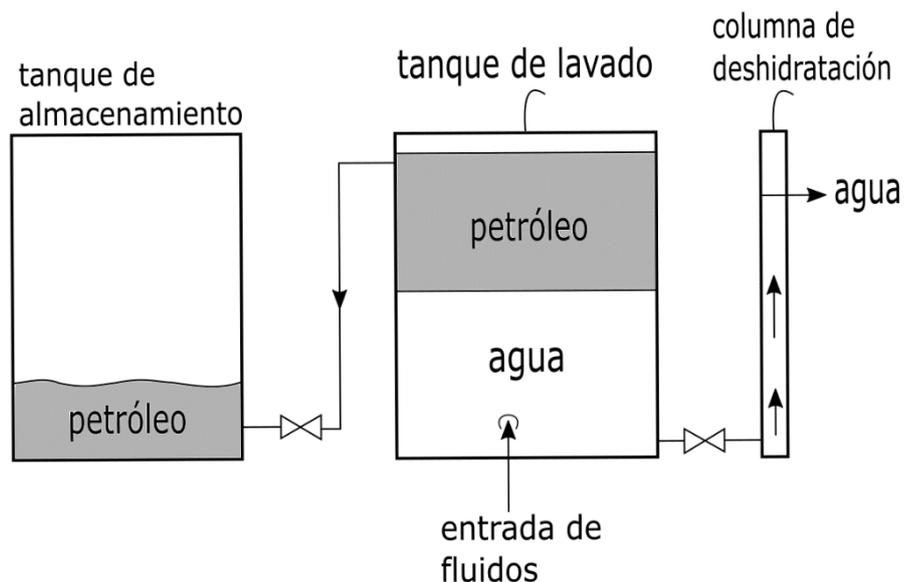


Figura 3. Esquema de separadores gravitacionales (Fuente: [8])

1.2.2 Diseño de tanques

Los tanques de almacenamiento de crudos tienen una guía de diseño basados en la ingeniería. Estos diseños se han estandarizado a nivel internacional y siguen normas para asegurar su seguridad y rendimiento [9]

Dependiendo de su material, sus dimensiones, su función y fluidos que almacena, los tanques de almacenamiento y separación gravitacional son diseñados bajo una o más normativas estandarizadas. Los reglamentos más utilizados se encuentran tabulados en la tabla 1.

Tabla 1. Reglamentos estandarizados de diseño de tanques

Reglamentos estandarizados	Descripción
API-650	Diseños de tanque de almacenamiento de fluidos a presión atmosférica menor a 18 kPa con un límite de temperatura de 93°C. Sugiere procedimientos de soldadura, montura y manejo del tanque en función de su material. [10]

Reglamentos estandarizados	Descripción
API-620	Diseño y construcción de tanques de dimensiones grandes hechos desde acero hasta carbono con un rango de presiones desde los 18 kPa hasta los 103.4 kPa [11].
ASME ANSI B96.1	Normativa similar a la API650 pero para tanques de aluminio [12].
API-12D	Normativa de diseño, fabricación e instalación de tanques cilíndricos verticales, sobre superficie, soldados y fabricados de acero con capacidades nominales de 79.5 a 1590 metros cúbicos [13].
API 12F	Igual a la 12D pero enfocada a capacidades de 14.3 hasta 119.25 metros cúbicos [14].

(Fuente: Gil, 2020)

1.3 Emulsiones

Las emulsiones son un tipo de sistema disperso que consiste en dos líquidos inmiscibles: la fase dispersa esparcida en gotas dentro de la fase continua que es el medio [15]. En la figura 4 se clasifican según las fases que las componen.

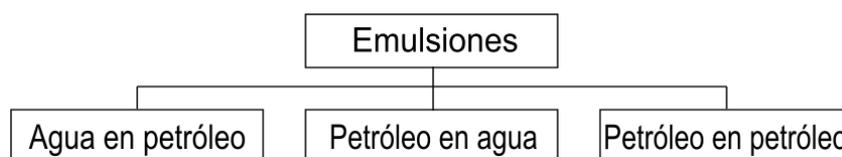


Figura 4. Esquema de clasificación de emulsiones (Fuente: [16])

1.3.1 Principios de rompimiento de emulsiones

Las Emulsiones presentan una película cuya ruptura permite la separación de las fases, esta ruptura se consigue mediante diferentes tratamientos que están basados en los siguientes principios:

1.3.1.1 Aceleración gravitacional

Las partículas de fluido más densas se separan de las menos densas debido a la aceleración de la gravedad. El peso resultante de las partículas más densas supera la fuerza de arrastre que ejerce la fase continua o el agente emulsificante. Este concepto nos permite el entendimiento de la velocidad de asentamiento que es modelada con la ley de Stokes [17].

$$V = \frac{g \cdot d^2 \cdot (\rho_d - \rho_f)}{18\mu_f} \quad (1)$$

Donde:

V es la velocidad terminal en m/s

g es la aceleración gravitacional en m/s^2

d es el diámetro de la gota en m

ρ_d es la densidad de la gota en kg/m^3

ρ_f es la densidad de la fase continua en kg/m^3

μ_f es la viscosidad de la fase continua en $Pa \cdot s$

1.3.1.2 Centrifugación

La aceleración centrífuga es un fenómeno que se manifiesta a causa de la propiedad de la inercia de los cuerpos que son sometidos por movimiento en una trayectoria curva. Dependiendo de la velocidad y trayectoria de la partícula en movimiento, la aceleración puede superar con facilidad la magnitud de la aceleración gravitacional. Pudiendo así superar la fuerza de arrastre de la fase continua de la emulsión [18].

1.3.1.3 Coalescencia

Cuando una gota de fluido es muy pequeña no se puede separar de la fase continua únicamente con aceleración gravitacional. Como se muestra en la figura 5, el fenómeno de coalescencia consiste en que estas pequeñas gotas de fluido se unan para formar gotas de mayor tamaño (crecimiento de gotas) y así superar las fuerzas de arrastre de la fase continua [19].

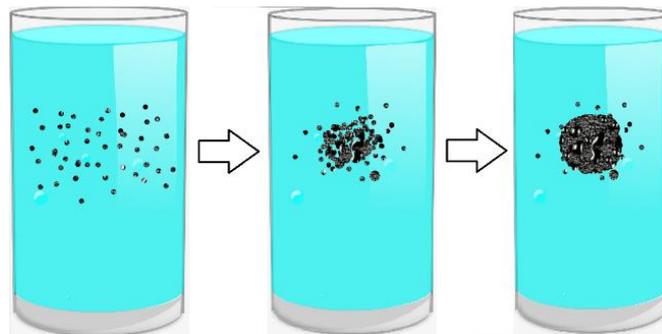


Figura 5. Fenómeno de coalescencia
(Fuente: Gil, 2020)

1.3.1.4 Cantidad de movimiento

O momentum, es una magnitud vectorial fundamental definida por el producto de la masa de un cuerpo o partícula y su velocidad instantánea. Al tener flujo de dos fases donde las partículas de ambos fluidos se mueven a la misma velocidad, un cambio brusco de trayectoria de la corriente separaría las partículas de mayor densidad a causa de que estas poseen un mayor momentum y es más difícil que cambien su trayectoria a diferencia de las de menor densidad [20]. Este y los conceptos anteriormente mencionados junto con la Dinámica de fluidos son fundamentales para el entendimiento de la separación de fases inmiscibles.

1.4 Dinámica de fluidos

La Dinámica de fluidos es parte de la mecánica, esta describe las leyes que rigen el movimiento de los fluidos, incluye la aerodinámica, hidrodinámica y tiene múltiples aplicaciones en la ingeniería [21].

Dado que las partículas que conforman un fluido son microscópicas, los fluidos se consideran medios continuos, cada pequeño elemento de este medio puede contener un número enorme de moléculas lo que hace de las ecuaciones que modelan el flujo de fluidos presenten una alta complejidad en su resolución [22].

1.4.1 Número de Reynolds

Variable adimensional que relaciona la densidad de un fluido, su viscosidad, el diámetro del tubo por el cual fluye y la velocidad con la que fluye definiéndose como la relación de la fuerza de inercia sobre un elemento de fluido a la fuerza viscosa [23].

$$Re = \frac{\rho u d}{\mu} = \frac{u d}{\nu} \quad (2)$$

Donde:

Re es el número de Reynolds (adimensional)

ρ es la densidad del fluido en kg/m^3

u es la velocidad del fluido en m/s

d es la longitud característica del fenómeno en m

μ es la viscosidad dinámica del fluido en $Pa \cdot s$

ν es la viscosidad cinemática del fluido en m^2/s

1.4.2 Regímenes de flujo

El flujo de fluidos se puede dividir en 3 regímenes según su turbulencia como se describe en la tabla 2 y se ilustran en la figura 6.

Tabla 2. Descripción de regímenes de flujo

Régimen de flujo	Descripción
Flujo laminar	Ocurre cuando el fluido fluye en capas paralelas infinitesimales sin alteraciones entre ellas, aquí el flujo se caracteriza por no tener ninguna corriente normal al mismo. [24] Presenta un $Re < 2000$

Flujo en zona crítica o transición	Ocurre cuando las líneas de flujo laminar comienzan a ondularse hasta romper de forma difusa en flujo turbulento [24]. Presenta un $2000 < Re < 4000$
Flujo turbulento	Caracterizado por el flujo caótico en contraste al flujo laminar, las partículas se mueven de forma desordenada y su trayectoria suele formar remolinos o espirales [25]. Presenta un $Re > 4000$

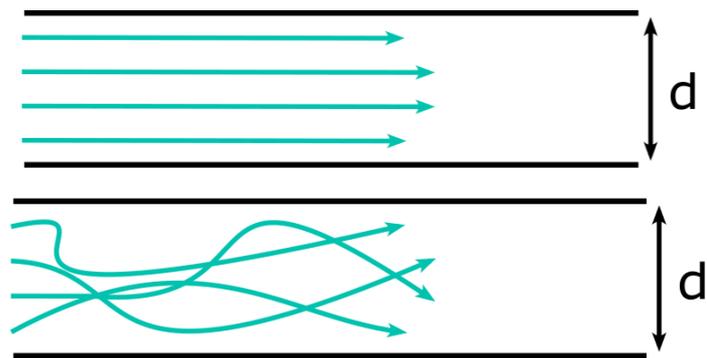


Figura 6. Líneas de flujo en flujo laminar y turbulento en una tubería (Fuente: [24])

1.4.2.1 Estructura de la turbulencia

Lewis Fry Richardson explica el funcionamiento estructural de la turbulencia mediante cálculos matemáticos: “Los remolinos grandes tienen remolinos pequeños que se alimentan de su velocidad y estos tienen remolinos más pequeños sucesivamente que disminuyen con la viscosidad” Todo esto se debe a la transferencia de energía cinética entre las partículas involucradas en estos fenómenos que se repiten en forma de cascada de energía como se ilustra en la figura 7.

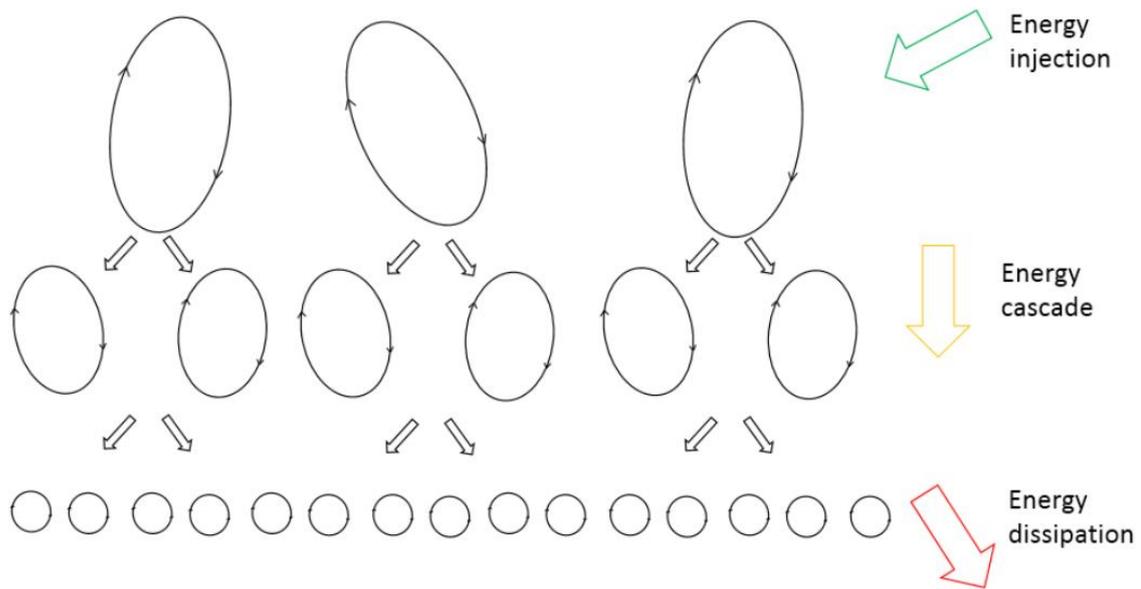


Figura 7. Cascada de energía en turbulencias
(Fuente: [26])

1.4.3 Descripción del movimiento de los fluidos

Para describir el flujo de fluidos en un medio continuo se puede adoptar 2 enfoques diferentes, como se explica en la tabla 3.

Tabla 3. Enfoques para describir el movimiento de los fluidos

Enfoque	Descripción
Enfoque Lagrangiano	Estudia el flujo de fluidos a partir de una partícula, observando su comportamiento durante todo su desplazamiento. Esto se logra al describir el movimiento mediante las leyes de Newton para los cuerpos de masa fija siguiendo de cerca el comportamiento vectorial de su posición y velocidad [27].
Enfoque Euleriano	Estudia el flujo de fluidos a partir de un volumen de control, observando el flujo de entrada y de salida. Se les pone especial atención a las variables presentes independientemente del número de partículas [27].

Se parte de los enfoques mencionados para la obtención de los principios de continuidad, conservación de movimiento lineal y conservación de la energía.

1.4.4 Principio de continuidad

La masa se conserva, en un sistema como se ilustra en la figura 8, con un volumen de control finito de superficie S donde la velocidad de flujo es v , el vector de área elemental es dS , el volumen elemental dentro del volumen de control es dV

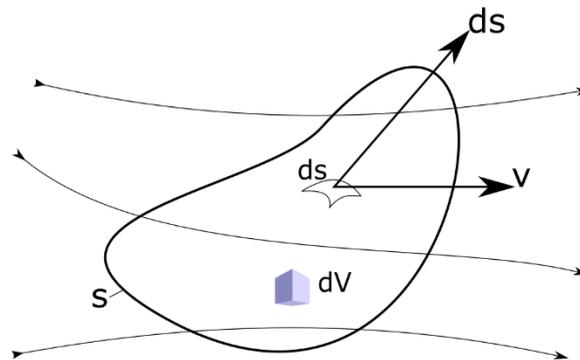


Figura 8. Volumen de control de dimensiones finitas para continuidad
(Fuente: [28])

Partiendo del principio, se sabe que la masa que fluye fuera del volumen de control a través de la superficie es igual a la tasa de decrecimiento de masa en el volumen de control. Al poner en términos del sistema y operar considerando la salida de masa se obtiene la forma integral conservativa del principio de continuidad.

$$\frac{\partial}{\partial t} \iiint_V \rho dV + \iint_S \rho \mathbf{v} \cdot d\mathbf{S} = 0 \quad (3)$$

Donde:

ρ es la densidad en kg/m^3

V es el volumen en m^3

S es la superficie en m^2

t es el tiempo en s

Esta ecuación también se puede expresar en las formas: integral no conservativa, diferencial conservativa y no conservativa que corresponden a un volumen de

control en movimiento con el flujo, un elemento infinitesimal fijado en el espacio y un elemento infinitesimal moviéndose con el flujo respectivamente [28].

1.4.5 Principio de conservación de movimiento lineal

Tiene como principio que la fuerza es igual a la masa por aceleración (segunda ley de Newton)

$$F = m \cdot a \quad (4)$$

Teniendo en cuenta una partícula de fluido infinitesimalmente pequeña en movimiento, se puede descomponer en sus ejes, por lo que se analiza en el eje X.

$$F_x = m \cdot a_x \quad (5)$$

A la partícula afectan 2 fuerzas, las fuerzas que afectan directamente la masa volumétrica (gravitacional, eléctrica, magnética) y las que afectan la superficie de la partícula [28]. Al considerarse la fuerza neta que afecta la partícula, las fuerzas de cizalla, el estrés normal dependiente de la velocidad, en el eje X se obtiene la ecuación 6.

$$\rho \frac{Du}{Dt} = -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} + \rho f_x \quad (6)$$

Esta ecuación y sus aplicaciones en los demás ejes son las ecuaciones de Navier-Stokes donde:

u es el componente unitario del eje X

τ son las fuerzas de cizalla y estrés normal en N/m^2

p es la presión en N/m^2

f_x es la fuerza que actúa directamente en el cuerpo en el eje x en N

1.4.6 Principio de conservación de la energía

La primera ley de la termodinámica enuncia que “La energía se conserva” que aplicada hacia una partícula que se mueve con el flujo, se establece que la tasa de cambio de la energía en la partícula de fluido es igual al flujo neto de calor hacia el elemento más el trabajo que se realiza en la partícula por las fuerzas de superficie, resultando en la ecuación 7 [28].

$$\begin{aligned} & \rho \frac{D}{Dt} \left(e + \frac{V^2}{2} \right) \\ &= \rho q + \frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k \frac{\partial T}{\partial z} \right) - \frac{\partial (up)}{\partial x} - \frac{\partial (vp)}{\partial y} \\ & - \frac{\partial (wp)}{\partial z} + \frac{\partial (u\tau_{xx})}{\partial x} + \frac{\partial (u\tau_{yx})}{\partial y} + \frac{\partial (u\tau_{zx})}{\partial z} + \frac{\partial (u\tau_{xy})}{\partial x} \\ & + \frac{\partial (u\tau_{yy})}{\partial y} + \frac{\partial (u\tau_{zy})}{\partial z} + \frac{\partial (u\tau_{xz})}{\partial x} + \frac{\partial (u\tau_{yz})}{\partial y} + \frac{\partial (u\tau_{zz})}{\partial z} \cdot \rho \mathbf{f} \cdot \mathbf{V} \end{aligned} \quad (7)$$

Donde:

u, v, w son los componentes unitarios de los ejes x, y, z respectivamente

f es la fuerza que actúa directamente en el cuerpo en N

V es la velocidad en m/s

q es la transferencia de calor en W/m^2

k es la conductividad térmica en $W/(m \cdot K)$

1.5 Simulación numérica

La simulación numérica es una herramienta para la recreación de fenómenos físicos sin necesidad de recurrir a la experimentación, constituyéndose como una poderosa estrategia dentro de la ingeniería. Permite la predicción de comportamientos y obtención de soluciones en problemas donde se requiere el uso de modelos matemáticos que consideran algoritmos de cálculo y abstracción de ecuaciones fundamentales necesarias para cada caso [29].

1.5.1 CFD

La Dinámica de Flujo Computacional es una herramienta de la ingeniería para la simulación numérica de fluidos que se basa en principios físicos (conservación de la masa, segunda ley de Newton y la conservación de la energía) [28], para entregar soluciones analíticas en contraste de una colección de cálculos.

1.5.1.1 Metodología de CFD

Los análisis con dinámica de flujo computacional se realizan en 3 partes que, como se muestra en la figura 9, contienen los pasos a seguir [30].

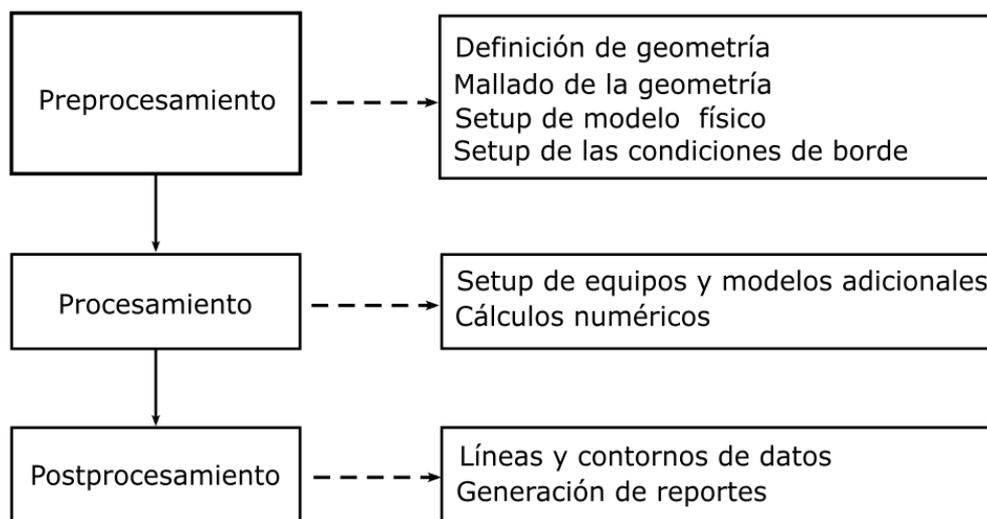


Figura 9. Metodología de CFD
(Fuente: [30])

Obtenidos los resultados de simulación se debe evaluar la solución para asegurar que no existen errores. Aquí es donde es importante el criterio de ingeniería para ser aplicado hacia la convergencia.

1.5.1.2 Discretización del espacio

Dentro de CFD la geometría de la región de flujo donde se realizarán los cálculos se divide en espacios pequeños mediante una malla, para analizar el flujo en cada uno de sus elementos. Como se describe en la tabla 4, las mallas pueden ser estructuradas, no estructuradas e híbridas.

Tabla 4. Tipos de mallados

Tipo de malla	Descripción
Estructurada	Malla cuyos elementos topológicos se caracterizan por una conectividad regular y puede expresarse como una matriz de 2 o 3 dimensiones.
No estructurada	Se caracteriza por la irregularidad de su conectividad y no se expresa fácilmente como matriz en la memoria de los dispositivos.
Híbrida	Contiene porciones de naturaleza estructurada y no estructurada [31]

(Fuente: [32])

1.5.1.3 Modelos de turbulencia

Los fenómenos de flujo en su mayoría están dominados por la turbulencia [33], por esto en ingeniería se plantea su funcionamiento dentro de los programas que la modelan. Para entender el flujo turbulento en un volumen de control se asume un flujo sobre una superficie plana, como se ilustra en la figura 10, que fluyendo de izquierda a derecha se comienza con flujo laminar que se extiende por toda la superficie en una capa amortiguadora y este se va adquiriendo turbulencia en proporción a la distancia con la pared, desde pequeñas oscilaciones en cada capa de flujo hasta convertirse en un flujo caótico y turbulento [34].

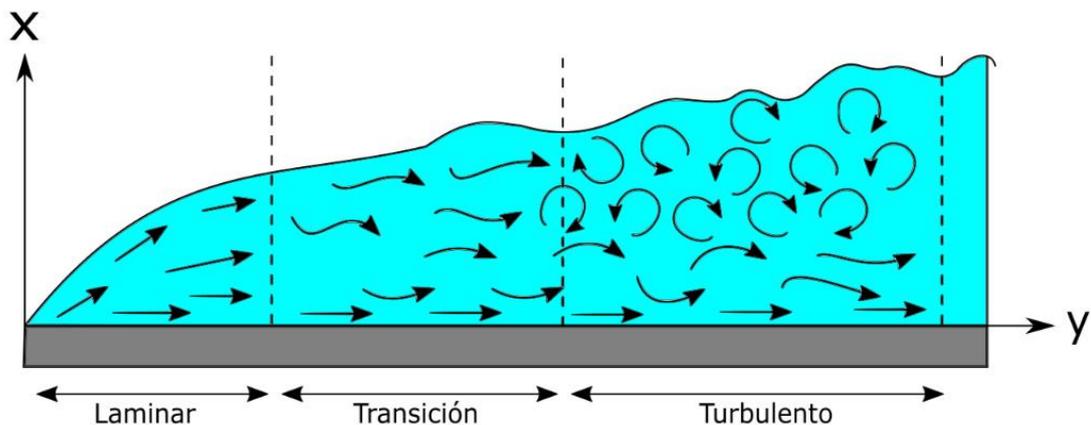


Figura 10. Transición de flujo laminar a turbulento
(Fuente: [34])

Estas regiones se pueden relacionar con el número de Reynolds, en el flujo laminar utilizando las ecuaciones de Navier-Stokes se puede predecir el comportamiento de las partículas. Una vez se entra a la zona de transición las ecuaciones de Navier-Stokes deben ser resueltas en dependencia al tiempo (además de tener una relación con el tamaño de los componentes de la malla) ya que los remolinos que se forman con el aumento de la velocidad llegan a tener tamaños más pequeños junto con sus oscilaciones. Además, factores como la velocidad de flujo y cercanía de las partículas de fluido a las superficies que encierran el flujo afectan los modelos que describen la intensidad de la turbulencia [34].

Dentro de ANSYS-CFX se manejan distintos modelos de turbulencia:

- K- ϵ : Resuelve en base a dos variables: la energía cinética de la turbulencia (k) y la tasa de disipación de esta (ϵ). No se simula la capa amortiguadora ya incluye funciones de superficies, suele utilizarse para múltiples aplicaciones industriales entregando buenas convergencias y bajo consumo de recursos computacionales [35].
- K- ω : Similar al modelo anterior, pero maneja una tasa específica de disipación de la energía cinética y es un modelo para números de Reynolds bajos. Requiere más recursos computacionales y sirve especialmente para casos donde K- ϵ converge con dificultad. Funciona con flujos internos, Flujos separados, Jets entre otros [35].
- K- ω Shear Stress Transport (SST): Consiste en una combinación del K- ϵ en flujo libre con uso de K- ω en las zonas cercanas a las paredes. Este modelo funciona con números de Reynolds bajos y es importante en aplicaciones industriales. Este modelo elimina algunas de las fallas de los 2 anteriores [35].
- Modelos de estrés de Reynolds: Son los modelos más generales de turbulencia, y se aplica para muchísimos fenómenos de flujo en ingeniería. Utiliza una viscosidad isotrópica en los remolinos, resuelve todos los componentes de la ecuación de transporte turbulento y requiere únicamente las condiciones iniciales y las condiciones de borde [35].

1.5.1.4 Criterios de convergencia

Los modelos que dominan los fenómenos de flujo suelen ser de naturaleza no lineal, solo mediante la imposición de limitantes en las ecuaciones Navier-Stokes se pueden resolver. Estas soluciones deben realizarse de manera iterativa por lo que hacer un análisis de los resultados es necesario para no dudar de su veracidad [36]. Como se visualiza en la tabla 5, dentro de CFD **típicamente** existen 3 criterios de convergencia.

Tabla 5. Descripción de criterios de convergencia

Criterio de convergencia	Descripción
Valores residuales	Son medidores de los desbalances que tienen las variables que se calculan en cada volumen de control. Se caracterizan por tender a 0 aunque nunca van a llegar dicho valor. Es por esto que cuanto más se acerquen al 0 significa que los resultados de los cálculos matemáticos de la simulación son más precisos.
Desbalances de solución	Un criterio de convergencia es la conservación de los valores al llegar a la solución. Al ser una representación numérica de fenómenos físicos los desbalances nunca serán 0, sin embargo, mientras son monitoreados durante la simulación deben ser lo suficientemente pequeños para ser considerados convergentes.
Variabes de interés	Dentro del análisis en estado estable las variables en la solución no deben cambiar de iteración a iteración para poder considerarse convergente. Monitorear las variables que se evalúan en nuestros proyectos nos permite identificar si las variaciones en sus valores son mínimas, lo que es un indicador de convergencia.

(fuente: [36])

2 METODOLOGÍA

La metodología empleada permitió comprobar el comportamiento propuesto en [3] para su diseño de tanques deshidratadores con platos coalescentes mediante CFD. En la figura 11 se muestra el esquema de la metodología presentando los módulos basados en la metodología de CFD que contienen los pasos del proyecto.

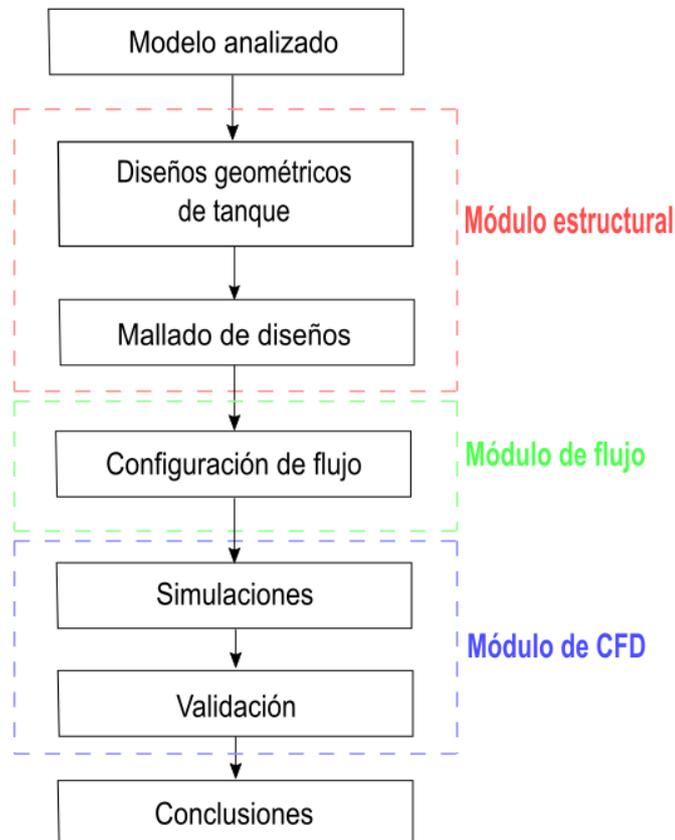


Figura 11. Esquema de metodología
(Fuente: Gil, 2020)

Inicialmente se realiza un análisis al modelo de optimización propuesto en la publicación de [3] para la realización de un diseño proporcional tomando en cuenta

la norma API650. Luego se realiza el diseño en 2 y 3 dimensiones utilizando *Spaceclaim*¹ para posteriormente mallarlo con *Meshing*² de ANSYS.

Posteriormente se establece las propiedades en el dominio de acuerdo con lo establecido en [3] y se seleccionan las condiciones de flujo de simulación (modelo de turbulencia, velocidades de flujo, condiciones de borde) en CFX-Pre³ adecuadas para trabajar en CFX-solver⁴.

Posteriormente, se realizan las simulaciones 2D y se estudia el comportamiento resultante del fluido en el dominio en CFX-post⁵ para su validación en comparación con los resultados de publicación ya mencionada. Finalmente se realiza el mismo procedimiento para las simulaciones 3D y se obtienen conclusiones.

¹ Herramienta de ANSYS-CFX para realizar diseños geométricos
² Herramienta de ANSYS-CFX para realizar Mallados (discretización del espacio)
³ Herramienta de ANSYS-CFX para definir las condiciones de flujo en el dominio
⁴ Herramienta de ANSYS-CFX para simulación de flujo
⁵ Herramienta de ANSYS-CFX para visualización de resultados de simulación

2.1 Módulo estructural

En este módulo se definen las dimensiones del tanque y el mallado en el que se evalúa el flujo dentro de CFX. La obtención de una geometría proporcional al diseño original es importante ya que los cambios al volumen de control dentro de una simulación influyen en los resultados [35].

2.1.1 Diseño geométrico

Para generar la geometría del tanque se empieza con la revisión bibliográfica que permite obtener la información del modelo original. En base a esta revisión. El dominio de flujo se replica utilizando Spaceclaim partiendo de las proporciones calculadas del modelo analizado. Primero se obtiene un diseño 2D, luego utilizando sus dimensiones se expande de manera axial con respecto a su eje Y para conseguir otro en 3D. Esta metodología se ilustra en la figura 12.

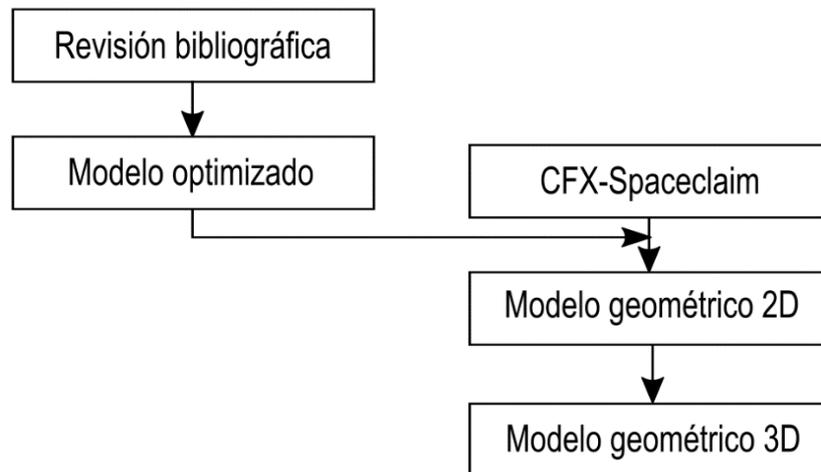


Figura 12. Esquema metodológico para obtención del modelo geométrico
(Fuente: Gil, 2020)

2.1.1.1 Modelo analizado

En el modelo analizado se presenta un diseño de tanque deshidratador con 2 platos coalescentes inclinados ubicados por encima y debajo del inlet, respectivamente, como se muestra en la figura 13. El objetivo de los platos es acelerar la separación del crudo y agua.

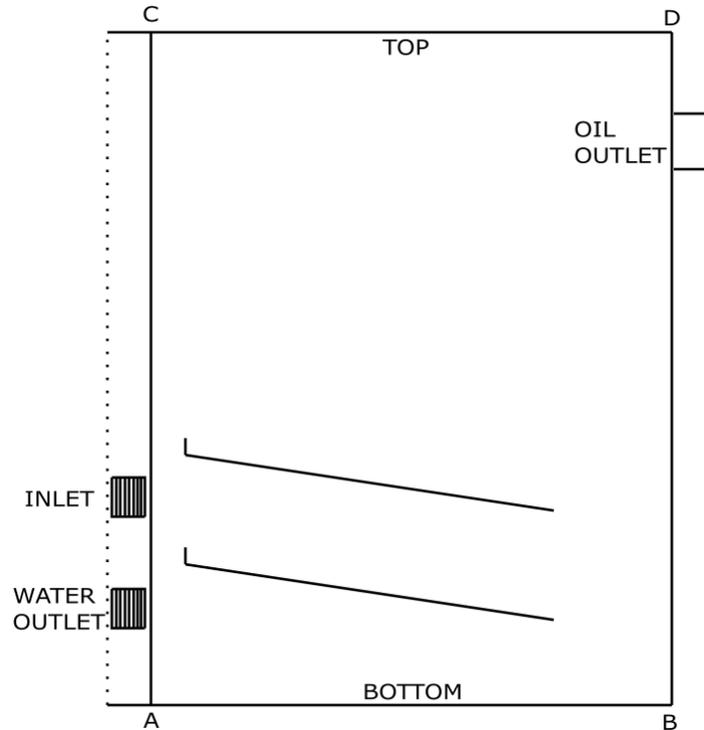


Figura 13. Esquema bidimensional de medio tanque
(Fuente: [3])

En la documentación del diseño no se especifica las dimensiones del tanque y se muestran diferentes relaciones altura/diámetro entre esquemas y simulaciones. Debido a esto se toma una de las imágenes de las simulaciones como guía y utilizando el *open-source*⁶ de Inkscape⁷, se obtienen las proporciones del diseño. Luego, mediante la normativa API650 se realiza en *spaceclaim* una serie de diseños con diferentes capacidades y modificaciones resultando en variantes del esquema de la figura 13.

Los cálculos de las proporciones se muestran en el Anexo I y se tabulan en las tablas 6 y 7 para ser utilizadas en la sección de diseño 2D.

⁶ Software de código abierto (uso gratuito)

⁷ Programa de edición de imágenes

Tabla 6. Proporciones del diseño con respecto a la altura

Elemento con respecto a la altura	Proporción
Relación altura/diámetro	0.85807
Outlet de agua	0.09097
Plato coalescente inferior	0.25451
Plato coalescente superior	0.39840
Inlet	0.32684
Outlet de petróleo	0.89038

(Fuente: Gil,2020)

Tabla 7. Proporciones del diseño con respecto al radio

Elemento con respecto al radio	Proporción
Gap de los platos	0.02609
Platos Coalescentes	0.77

(Fuente: Gil, 2020)

2.1.1.2 Funcionamiento del diseño

El sistema de entrada de fluido bruto viene desde una tubería externa hacia la tubería central del diseño que se encuentra instalada como una columna central en el tanque, el fluido sube hacia un sistema de ranuras en la tubería con patrón de engranaje. Una vez dentro del tanque ocurre la separación del agua y del petróleo yendo a las salidas superior e inferior, respectivamente. La salida del petróleo se encuentra en la parte perimetral del diseño y la salida del agua en la parte inferior de la tubería central con sistema de ranuras al igual que la entrada. El número de ranuras de entrada y salida varía de modelo a modelo para adecuarse con el módulo de flujo (ver Figura 14).

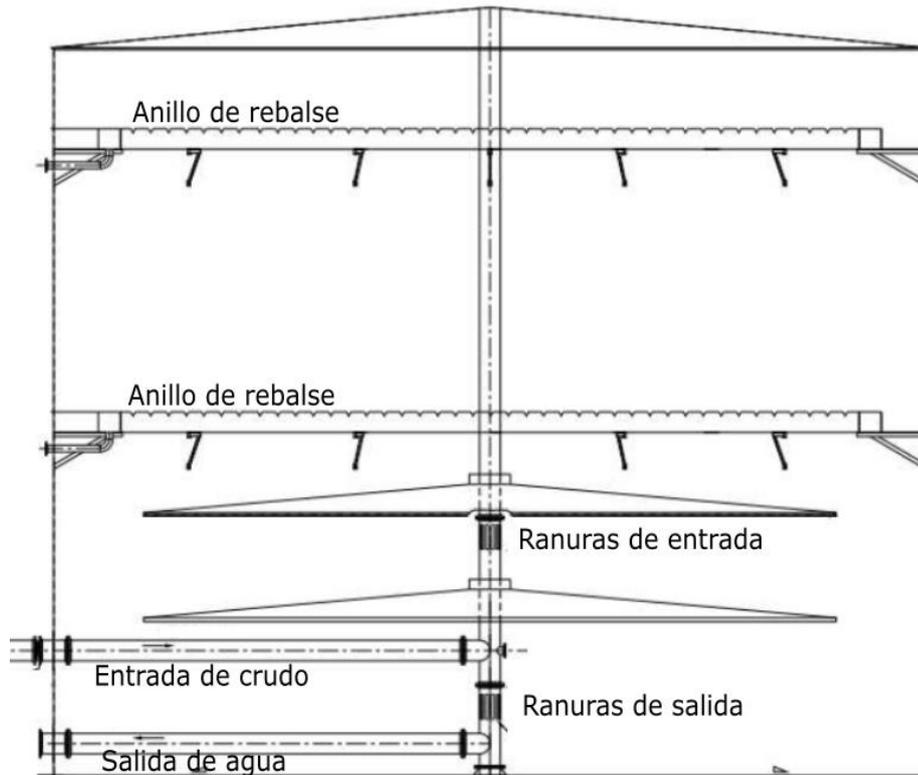


Figura 14. Esquema del tanque descrito (vista lateral)
(Fuente: [3])

2.1.1.3 Diseño 2D

Se realiza un diseño bidimensional axisimétrico de medio tanque para las simulaciones utilizando la normativa API650, tomando en cuenta proporción altura/diámetro del diseño optimizado haciendo uso de los Anexos II y III junto con los recursos computacionales disponibles.

Para la capacidad se selecciona 3020 Bbls, que corresponde a las dimensiones de tanques pequeños para almacenar petróleo y con la proporción del diseño de la bibliografía. Se obtiene las dimensiones tabuladas en la tabla 8.

Tabla 8. Fragmento del apéndice A1-b de la API650 para medidas de tanques

Diámetro del tanque (ft)	Capacidad por ft de altura (Bls)	Altura del tanque (ft) / Número de anillos de 72 [in] en tanque completo		
		12	18	24
		2	3	4
10	14	170	250	335
15	31.5	380	565	755
20	28.3	670	1010	1640
25	44.2	1050	1570	2100
30	36.6	1510	2270	3020

(Fuente: [10])

como práctica común de ingeniería [37] se agrega 1 ft de contingencia al diámetro utilizando la ecuación de capacidad de tanque en unidades del UCS:

$$C = 0.14 \cdot D^2 \cdot H \quad (8)$$

Donde:

C es la capacidad del tanque en barriles de 42 galones

D es el diámetro del tanque en ft

H es la altura del tanque en ft

$$C = 0.14 \cdot (31)^2 \cdot 24$$

$$C = 3228.96 [Bbls]$$

Dadas las dimensiones relativamente pequeñas del tanque no se toma la proporción original del espacio entre los platos y la tubería central sino una longitud mayor para la correcta circulación, tampoco se usa la misma proporción para la salida de petróleo para evitar la llegada del agua. Una vez terminado presenta las dimensiones ilustradas en la figura 15 y tabuladas en la tabla 9.

Tabla 9. Dimensiones del tanque

Elemento	Dimensión
Altura	24 ft
Diámetro	31 ft
Altura de entrada	8 ft
Altura de salida del petróleo	23.51 ft
Altura de salida del agua	2 ft
Altura de plato coalescente superior	9.97 ft
Altura de plato coalescente inferior	5.97 ft
Longitud de los platos coalescentes	12.15 ft
Grosor de los platos coalescentes	0.79 in
Espacio entre la columna y los platos	3.93 in
Grosor de diseño	0.79 in

(Fuente: Gil,2020)

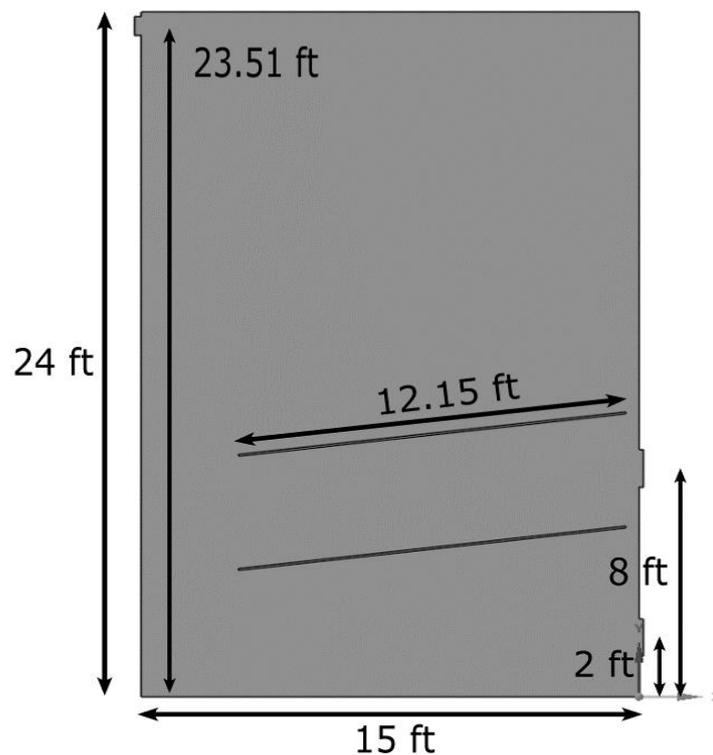


Figura 15. Dimensiones del diseño 2D
(Fuente: Gil, 2020)

Para este diseño se considera que la entrada de flujo neto y salida de agua tipo ranura partiendo de la columna central. Para conseguir ranuras simétricas se utiliza una herramienta de corte en Spaceclaim con forma de engranaje cuyos perfiles se ilustran en la figura 16, al recortar se obtiene 15 canales de 40 cm de alto y 2 cm de grosor de ancho. En la figura 17 se muestran las dimensiones finales de las entradas y salidas en el diseño 2D.

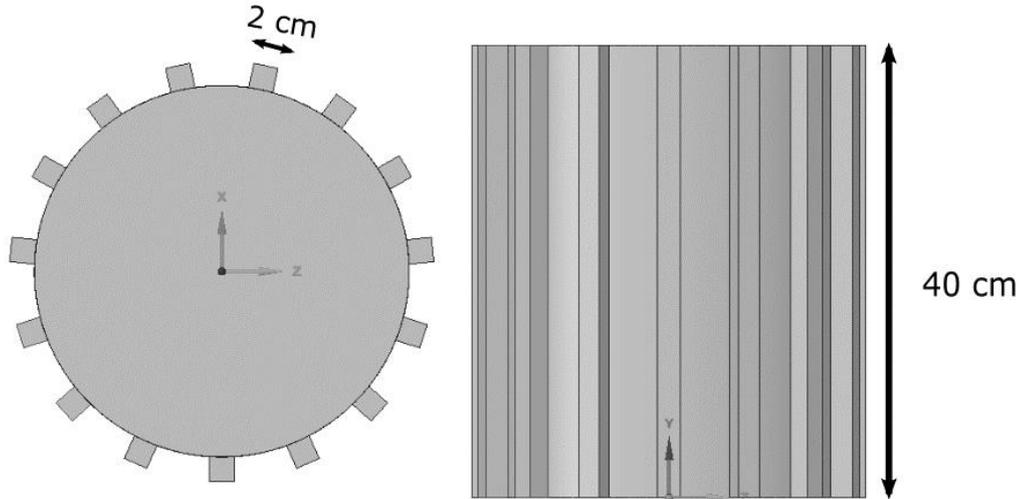


Figura 16. Vista lateral y superior de herramienta de corte para tubería central (Fuente: Gil, 2020)

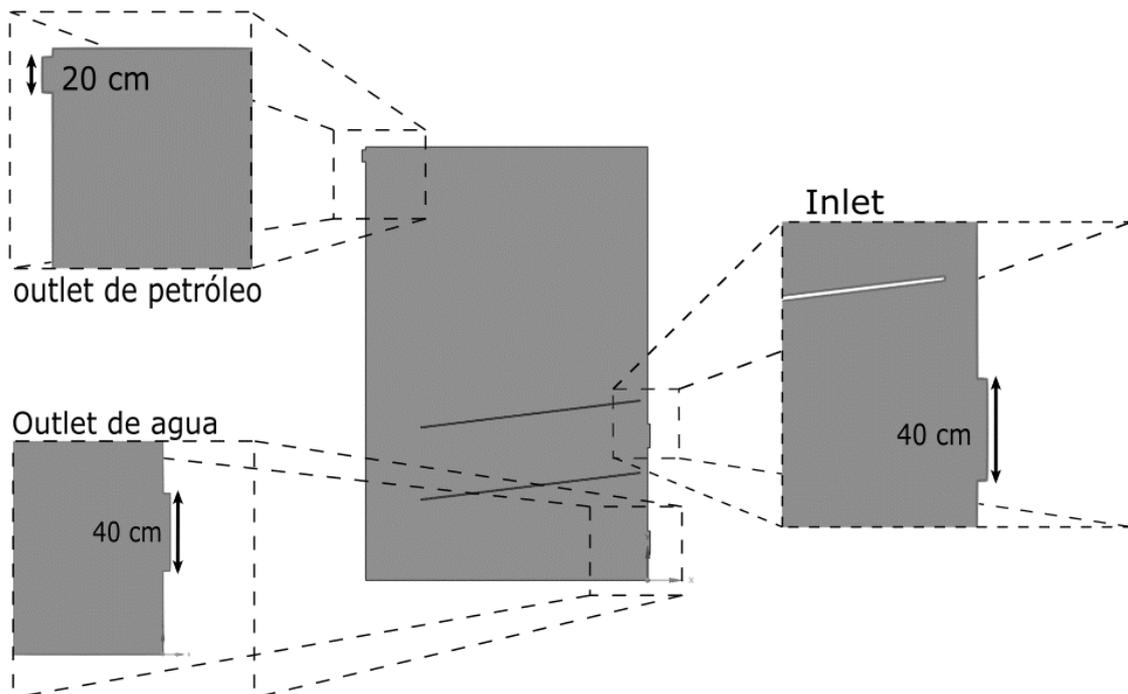


Figura 17. Tamaño de los inlets y outlets del diseño 2D (Fuente: Gil, 2020)

2.1.1.4 Diseño 3D

Se realiza una extensión del diseño 2D, ampliando su profundidad con un enfoque axial, como se muestra en la figura 18, para poder verificar el fenómeno tomando todas las consideraciones del diseño anterior.

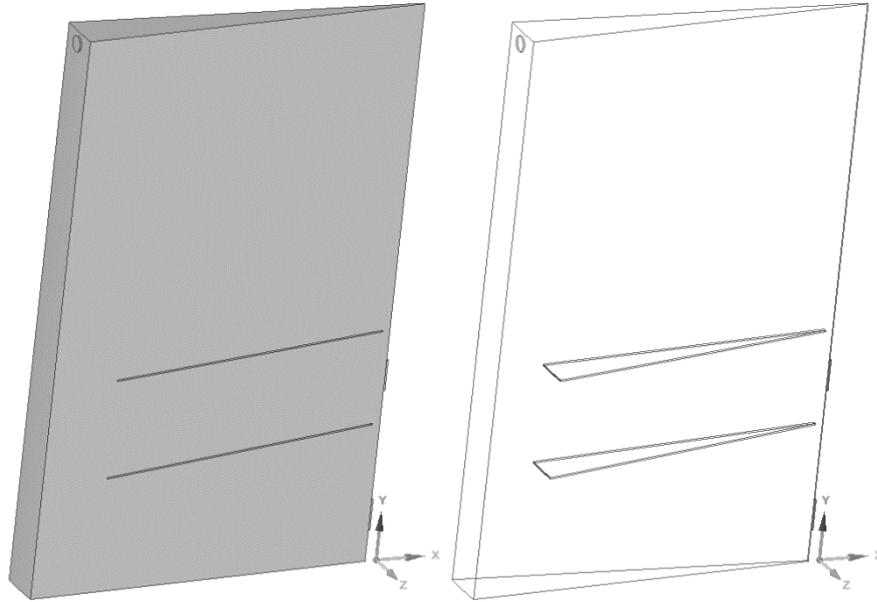


Figura 18. Diseño tridimensional
(Fuente: Gil, 2020)

Esta geometría se consigue al proyectar 7.5° el diseño 2D. Tomando las mismas dimensiones con respecto al eje Y, ubicado en el centro de la tubería central, de obtiene un *pulling*⁸ como el ilustrado en la figura 19. Sin embargo, las ranuras de la tubería central no son proyectadas (ver figura 20).

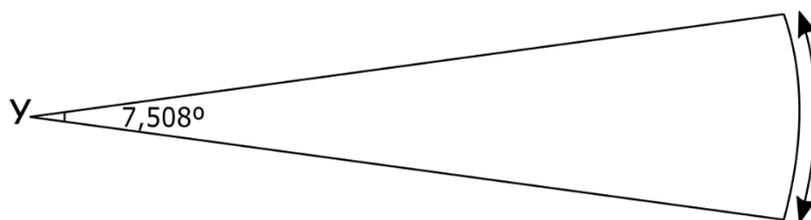


Figura 19. Pulling del modelo 2D para obtener el 3D
(Fuente: Gil, 2020)

⁸ Herramienta de Spaceclaim para estirar superficies

De esta forma se puede comprobar el fenómeno con una porción de la geometría del tanque total sin excederse en recursos computacionales.

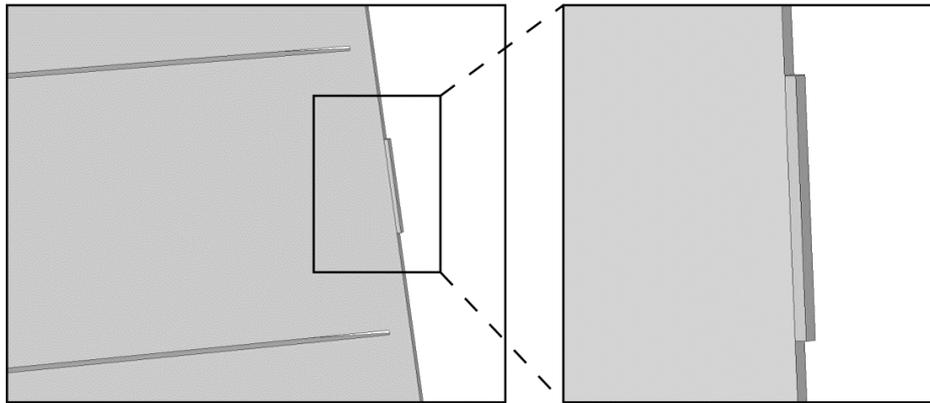


Figura 20. Entrada de fluido en el modelo 3D
(Fuente: Gil, 2020)

También se realizó una corrección con respecto a la ranura de salida del petróleo, se realiza ahora como una tubería saliente en contraste con el diseño 2D (forma de ranura), por lo que se establece como una superficie circular de 20 cm de diámetro que sobresale de la parte exterior del diseño (ver figura 21).

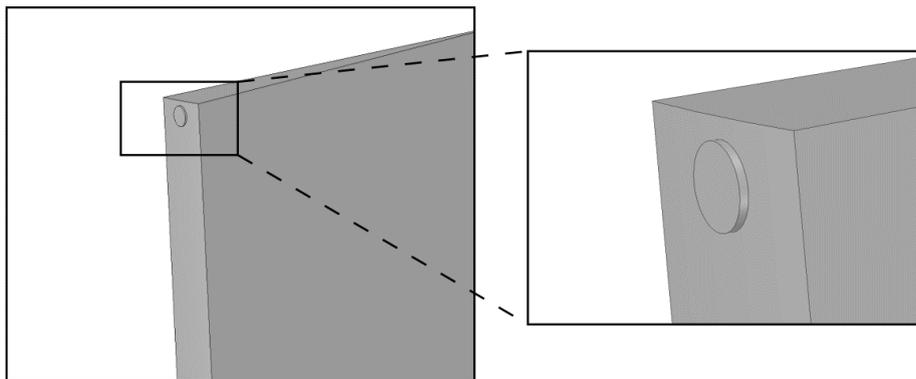


Figura 21. Salida de petróleo del modelo 3D
(Fuente: Gil, 2020)

2.1.2 Generación de malla

El mallado consiste en la discretización del dominio de flujo. Esto permite efectuar un análisis en cada una de las celdas para obtener las concentraciones de fluido, velocidades instantáneas, aceleraciones entre otras propiedades de interés en la simulación. La metodología se esquematiza según el diagrama de la figura 22.

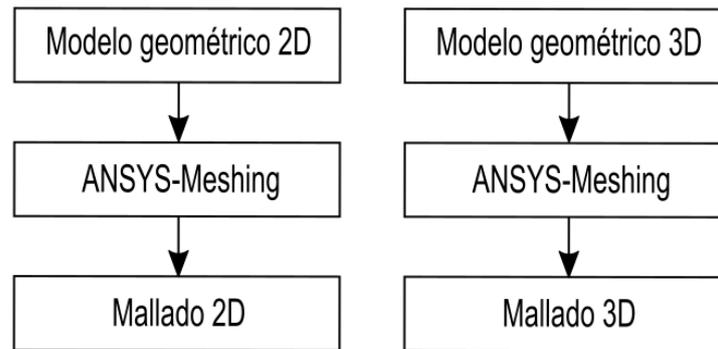


Figura 22. Metodología de obtención de mallado
(Fuente: Gil, 2020)

2.1.2.1 Generación de malla 2D

Se utilizó la aplicación *meshing* para generar una malla 2D no estructurada del tanque. Este mallado se realizó con un enfoque especial en la herramienta de *inflation*⁹ en los platos coalescentes y superficies de los bordes. Se utilizó la configuración de la tabla 10 para obtener un mallado de 113405 nodos y 270212 elementos como se muestra en la figura 23 y cuyos detalles se presentan en la figura 24.

⁹ Herramienta de CFX-Meshing para la creación de capas de mallado

Tabla 10. Cambios en configuración en *meshing* para mallado del modelo 2D

Parámetro	Valor o configuración
<i>Element order</i>	Linear
<i>Element Size</i>	0.020 [m]
<i>Smoothing</i>	High
<i>Inflation</i>	Program Controlled
<i>Inflation option</i>	Total thickness
<i>Number of inflation layers</i>	12
<i>Grow rate</i>	1.2
<i>Maximun thickness</i>	0.02 [m]

(Fuente: Gil, 2020)

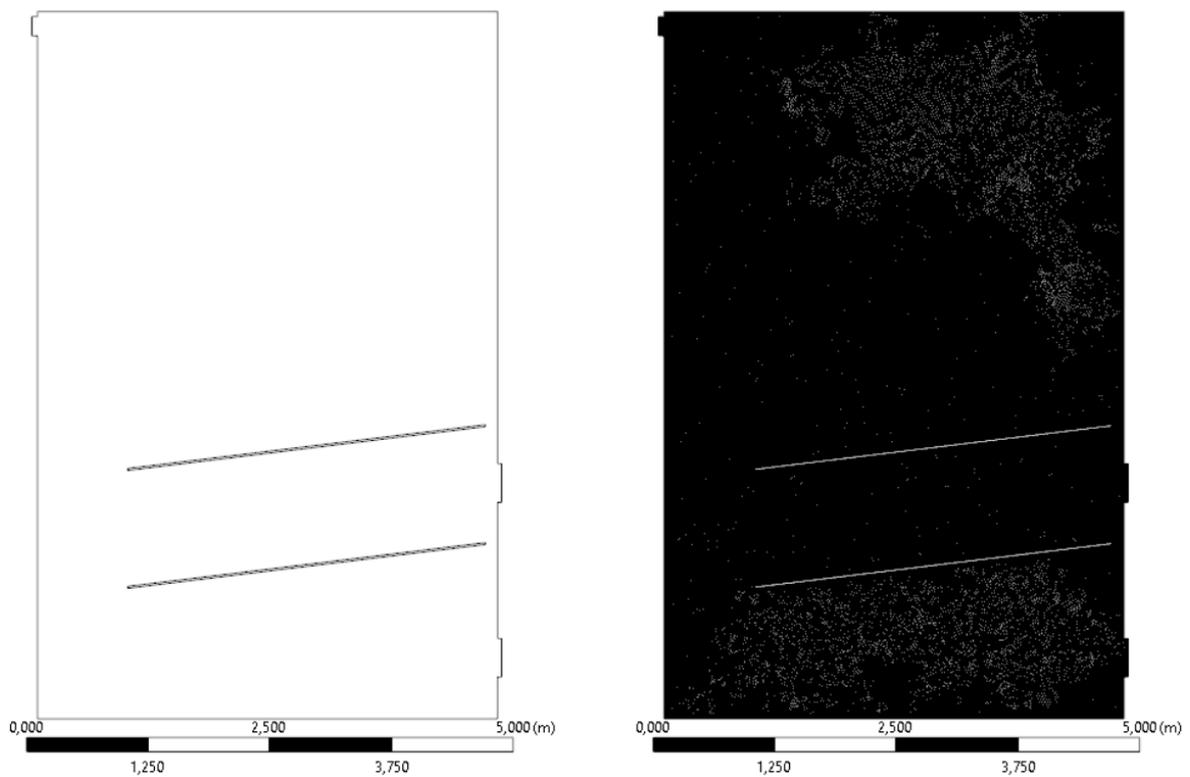


Figura 23. Vista frontal del mallado del diseño 2D
(Fuente: Gil, 2020)

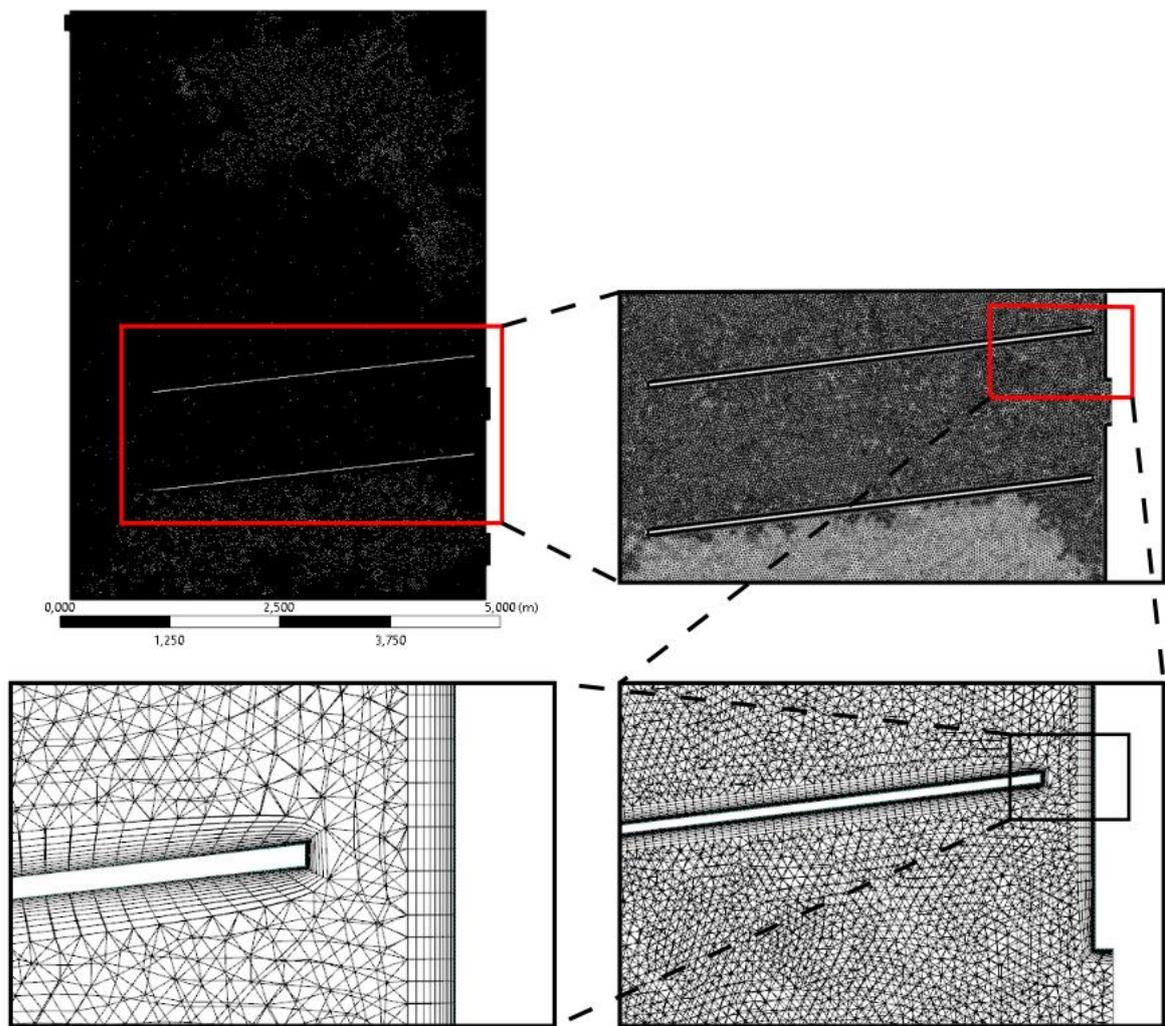


Figura 24. Detalles de *inflation* del mallado del diseño 2D
(Fuente: Gil, 2020)

2.1.2.2 Mallado de diseño 3D

Para la realización del mallado 3D se utilizó los cambios en la configuración dentro de Meshing mostrados en la tabla 11, obteniéndose un mallado de 933442 nodos y 3450957 elementos como se muestra en la figura 25 cuyos detalles de *inflation* se ilustran en la figura 26.

Tabla 11. Cambios en configuración en *meshing* para mallado del modelo 3D

Parámetro	Valor o configuración
<i>Element order</i>	Linear
<i>Element Size</i>	0.027 [m]
<i>Smoothing</i>	High
<i>Inflation</i>	<i>Program Controlled</i>
<i>Inflation option</i>	<i>Total thickness</i>
<i>Number of inflation layers</i>	10
<i>Grow rate</i>	1.2
<i>Maximum thickness</i>	0.02 [m]

(Fuente: Gil, 2020)

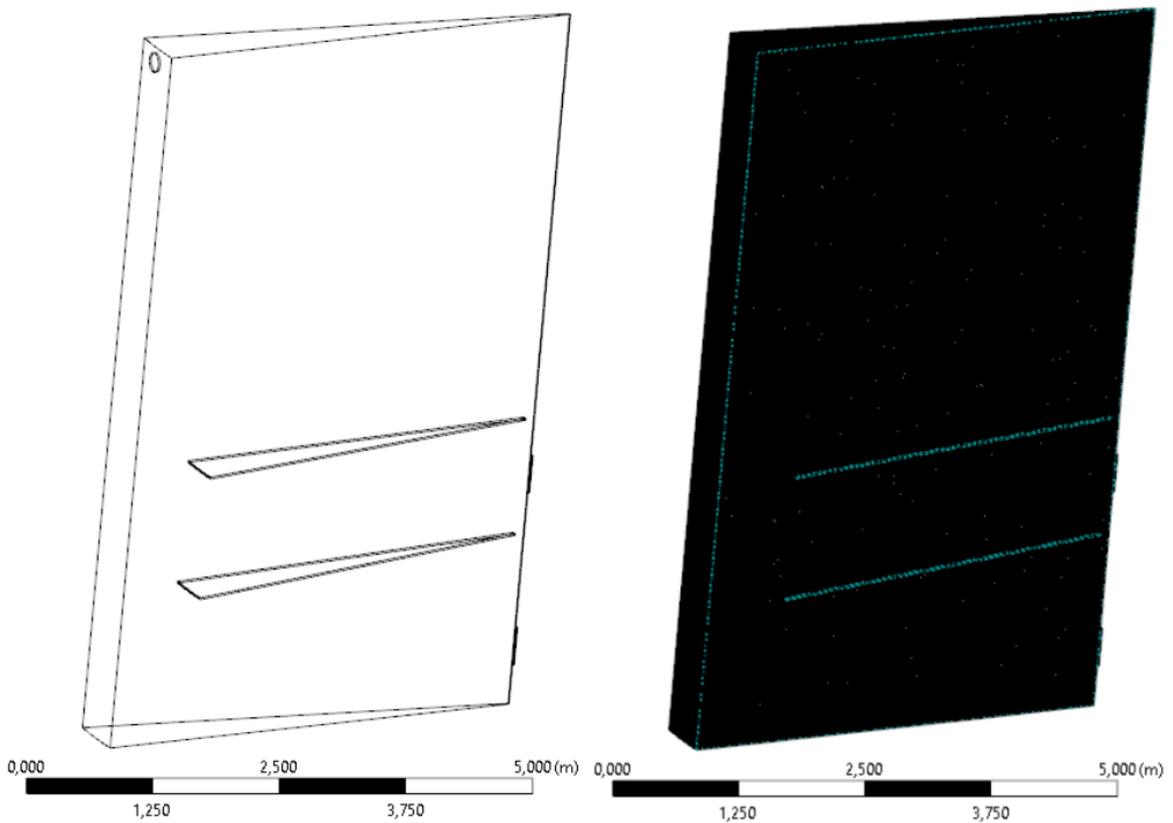


Figura 25. Vista inclinada del mallado del diseño 3D
(Fuente: Gil, 2020)

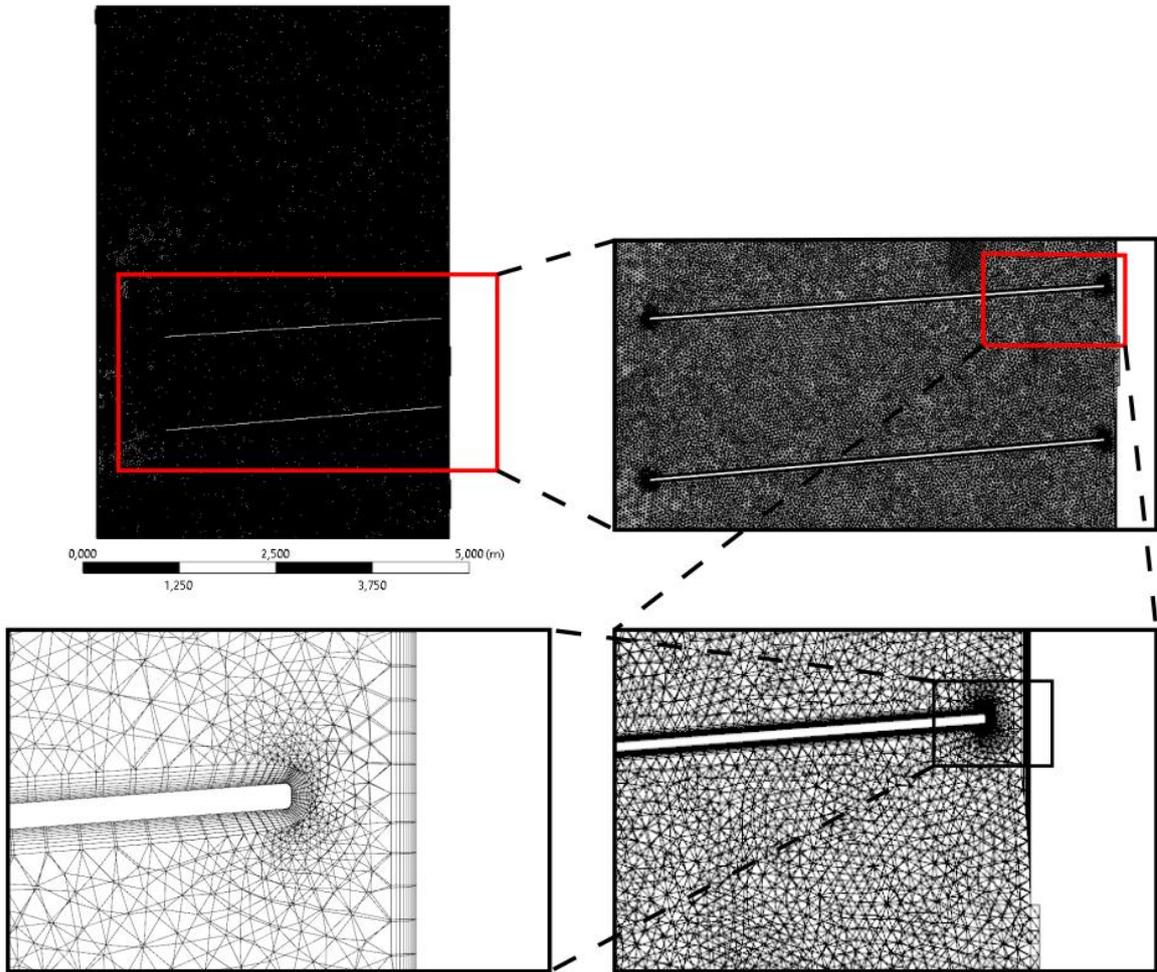


Figura 26. Detalles del mallado 3D
(Fuente: Gil, 2020)

2.2 Módulo de flujo

Dentro de este módulo de la metodología se analiza el modelo a ser validado para definir las condiciones de flujo en el dominio junto con las propiedades de los fluidos y los límites de los diseños. En la figura 27 se muestra el esquema metodológico para la obtención de las condiciones de flujo.

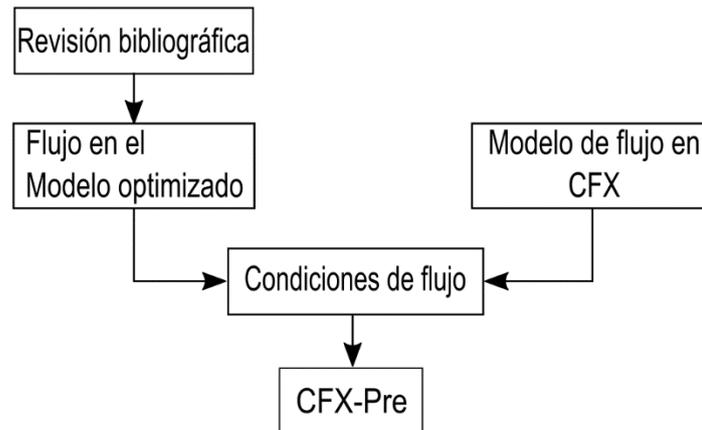


Figura 27. Metodología de obtención de condiciones de flujo
(Fuente: Gil, 2020)

Las condiciones de velocidad, densidad, viscosidad, diámetro de gotas, concentración y dirección de los fluidos en el volumen de control determinan el correcto funcionamiento del tanque dentro de las simulaciones de CFD ya que directamente afectan los cálculos sobre el comportamiento de los fluidos.

2.2.1 Flujo en el modelo optimizado

Para las simulaciones en CFX en el volumen de control establecido por los diseños geométricos y sus respectivos mallados se analiza las condiciones de operación que usaron para el modelo optimizado en el artículo [3], su control automatizado de nivel y su implementación a CFX-Pre.

2.2.1.1 Condiciones de operación dentro del modelo optimizado

Los autores de [3] determinaron las condiciones de operación realizando algunas consideraciones previas, como:

- Se consideró la velocidad de separación de Stoke y el efecto de “entorpecimiento”¹⁰ de las partículas al acercarse al final de cada fase
- Se aplicó una simulación de control automatizado para el nivel de la interfase y evitar el malfuncionamiento del tanque
- Se utilizó un modelo monodisperso

Tras múltiples simulaciones, los autores del artículo [3] entregan las condiciones de operación necesarias para el funcionamiento del modelo propuesto. Estas están tabuladas en la tabla 12.

Tabla 12. Condiciones de operación para el modelo optimizado.

Condiciones de operación	Valor
Caudal bruto	10000 m ³ /día
Corte de agua	90%
Temperatura de operación	40°C
Densidad del crudo	871 kg/m ³
Viscosidad del crudo	13.8 cP
Diámetro de las gotas de crudo	100 µm
Densidad del agua	1078 kg/m ³
Viscosidad del agua	1 cP

(Fuente: [3])

2.2.1.2 Control automatizado de nivel

En la configuración del modelo numérico analizado se muestra una relación entre la separación del petróleo y la velocidad de drenaje. El crecimiento de la zona de separación genera un aumento en la velocidad de drenaje debido a la ruptura de las gotas cercanas a la interfase por acción de la presión. Esta relación es

¹⁰ Efecto con el cual la velocidad de las partículas de fluidos que se acercan a la interfase de la fase continua tiende a 0

preparada con comportamiento lineal por la falta de datos experimentales, relacionando el equilibrio de la velocidad de separación y de drenaje con la altura a la que se encuentra la interfase empleando control automatizado de nivel con la ecuación:

$$V_{ow} = (V_{sed} - V_{ow})(1 - \alpha_{oil})^a + V_{drain} \frac{H_{dpl}}{H_{setpoint}} \quad (9)$$

Donde:

V_{ow} es la velocidad de separación entre la fase de agua y crudo

V_{sed} es la velocidad de sedimentación de la ley de Stokes

α_{oil} es la fracción de crudo

α_{oil} es la corrección de Richardson y Saki

V_{drain} es la velocidad de drenaje

H_{dpl} es la altura de la interfase

$H_{setpoint}$ es la altura de equilibrio

Para añadir este control en CFX se genera un sistema doble de ecuaciones con principio en el anexo IV:

$$\begin{cases} v_{in} \cdot A_{in} = v_{oil} \cdot A_{oil} + v_{water} \cdot A_{water} \\ 0.1 \cdot v_{in} \cdot A_{in} = v_{oil} \cdot A_{oil} \end{cases} \quad (10)$$

$$\begin{cases} v_{in} \cdot A_{in} = v_{oil} \cdot A_{oil} + v_{water} \cdot A_{water} \\ 0.08 \cdot v_{in} \cdot A_{in} = v_{oil} \cdot A_{oil} \end{cases} \quad (11)$$

Donde:

v_{in} es la velocidad de entrada en el dominio en m/s

A_{in} es el área de la ranura de entrada en m^2

v_{oil} es la velocidad de salida de petróleo en m/s

A_{oil} es el área de la ranura o tubería de petróleo en m^2

v_{water} es la velocidad de salida de agua en m/s

A_{water} es el área de la ranura de agua en m^2

De esta manera cuando la altura de la interfase sea igual a la altura del equilibrio, la velocidad de salida de petróleo y de agua entra en un cambio permanente que le permite a la interfase mantener dicho nivel.

2.2.2 Modelo de flujo en CFX

La configuración de la simulación se introduce en CFX-Pre cuyo software permite establecer el tipo de simulación, el funcionamiento de las condiciones de borde, los fluidos a simular junto con los criterios de convergencia para las variables residuales y el número de iteraciones necesarias para cada paso del tiempo o para la simulación en general. Los parámetros que se utilizaron se tabularon en las tablas 13 a 19.

Tabla 13. Tipos de análisis utilizados

Tipo de análisis	Descripción
Estable	Permite obtener resultados sin repetir cálculos iterativos para cada uno de los pasos de tiempo estipulados por el programa.
Transiente	Repite iterativamente los cálculos según la configuración para reducir la diferencia entre variables residuales, converger con mayor precisión y obtener resultados por cada una de las unidades de tiempo que se estipulen en el programa.

(Fuente: Gil, 2020)

Tabla 14. Propiedades del petróleo para CFX

Propiedad del petróleo	Valor o parámetro
Definición	Sustancia pura
Estado	Líquido
Masa molar	15kg/mol
Densidad	870 kg/m ³
Calor específico	1887 J*kg ⁻¹ *K ⁻¹
Viscosidad dinámica	13.8 cP
Conductividad térmica	0.15 W*m ⁻¹ *K ⁻¹
Expansividad térmica	0.00074 K ⁻¹

(Fuente: Gil, 2020)

Tabla 15. Parámetros de dominio de flujo

Parámetro de dominio de flujo	Configuración
Fluidos en el dominio	Agua y petróleo
Densidad de referencia	1078 kg/m ³
Aceleración gravitacional	-9.82 m/s ² en dirección del eje Y
Fase continua del dominio	Agua
Fase dispersa del dominio	Petróleo
Transferencia de calor	Homogénea
Presión de referencia	1 atm
Tamaño de gota del petróleo	100 μm
Modelo de turbulencia	k-ω SST
Análisis de flotabilidad	Diferencia de densidades
Fuerza de arrastre para agua/petróleo	Schiller Naumann

(Fuente: Gil, 2020)

Tabla 16. Condiciones de borde

Condiciones de borde	Input
<i>Inlet</i>	Velocidad de entrada de magnitud dependiente a los cálculos de cada diseño
<i>Outlet</i> de petróleo	Expresión <i>conditionalVO</i> en la coordenada u (x) de dirección de la velocidad. cálculo de fracción volumétrica como cero gradiente.
<i>Outlet</i> de agua	Expresión <i>conditionalVW</i> en la coordenada u (x) de dirección de la velocidad cálculo de fracción volumétrica como cero gradiente.
Simetrías	Establecidos en los lados de mayor dimensión del diseño Representación de la repetición axial en la simulación
<i>Walls</i>	Las paredes no asociadas a los anteriores límites se establecen como paredes con rugosidad de 5 μm

(Fuente: Gil, 2020)

Para la obtención de los resultados se incluyó 8 puntos fuente. Estos están ilustrados en la figura 28 y definidos en la tabla 17. Su función es la lectura de variables como presión absoluta y fracción volumétrica en momentos determinados de la simulación.

Tabla 17. Definiciones adicionales (Puntos Fuente)

Punto	Coordenadas		
	X	Y	Z
Ref 1	-4.6	2.3	0
Checkin	-0.25	2.4	0
Checkouto	-4.5	7.1	0
Checkoutw	-0.25	0.6	0
Checkup	-2.5	5.3	0
Checkdown	-2.5	0.6	0
Checkll	-4.5	0.6	0
Checkul	-4.5	4	0

(Fuente: Gil, 2020)

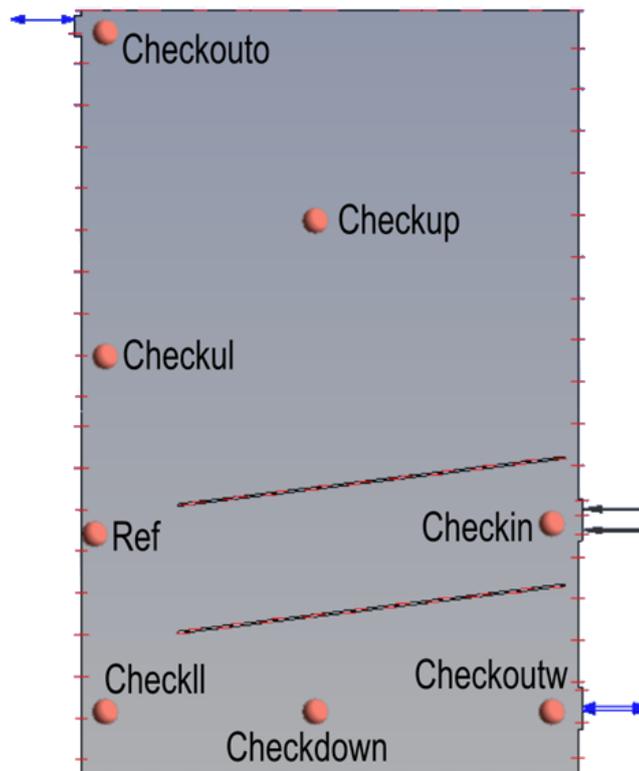


Figura 28. Puntos y condiciones de borde en el *setup*
(Fuente: Gil, 2020)

Tabla 18. Control de solución

Parámetro	Input
Número de iteraciones por <i>timestep</i> (transiente)	1-20
Tiempo de simulación	60 [s]
Análisis de turbulencia	Alta resolución
Análisis de flujo	<i>Upwind</i>
Objetivo de convergencia	X10e-07

(Fuente: Gil, 2020)

Tabla 19. Expresiones utilizadas

Expresión	Definición
Vlo	Menor velocidad disponible para la salida de petróleo en m/s
Vto	Mayor velocidad disponible para la salida de petróleo en m/s
Vlw	Menor velocidad disponible para la salida de agua en m/s
Vtw	Mayor velocidad disponible para la salida de petróleo en m/s
conditionalVO	if(probe(Oil.vf)@ref1 <= 0.9,lov,tov)
conditionalVW	if(probe(Oil.vf)@ref1 <= 0.9,twv,lwv)

(Fuente: Gil, 2020)

Las expresiones fueron utilizadas para el control y determinan la magnitud de la velocidad de salida de crudo y de agua de manera condicional a la concentración de petróleo en el punto de referencia, de esta manera mientras el nivel de agua no suba del punto se mantiene la velocidad de diseño, pero si el nivel llega a subir se establece un cambio en las velocidades de salida para que la salida de agua funcione a mayor velocidad.

2.2.3 Especificaciones para el diseño 2D

Aplicando los sistemas de la sección 2.2.1.2 se obtienen las velocidades para el diseño 2D. Los cálculos de muestran en los anexos V y VI cuyos los resultados están tabulados en las tablas 20 y 21, siendo las velocidades requeridas por las condiciones en [3] y las velocidades propuestas para el correcto funcionamiento de la simulación, respectivamente.

Tabla 20. Velocidades requeridas en diseño 2D por las condiciones de [3]

Velocidad en componente x	Magnitud [m/s]
Vin	0.964
Vlo	0.15424
Vto	0.1928
Vlw	0.8676
Vtw	0.88688

(Fuente: Gil, 2020)

Tabla 21. Velocidades propuestas para diseño 2D

Velocidad en componente x	Magnitud [m/s]
Vin	0.19
Vlo	0.0304
Vto	0.038
Vlw	0.171
Vtw	0.1748

(Fuente: Gil, 2020)

2.2.4 Especificaciones para el diseño 3D

Se repite el procedimiento de la sección 2.2.3 para obtener las velocidades para el diseño 3D. Los cálculos de muestran en el anexo VII cuyos los resultados están tabulados en las tablas 22 y 23 siendo también las requeridas en [3] y las propuestas, respectivamente.

Tabla 22. Velocidades requeridas en diseño 3D por las condiciones de [3]

Velocidad en componente x	Magnitud [m/s]
Vin	0.964
Vlo	0.019638
Vto	0.024548
Vlw	0.8676
Vtw	0.88688

(Fuente: Gil, 2020)

Tabla 23. Velocidades propuestas para diseño 3D

Velocidad en componente x	Magnitud [m/s]
V _{in}	2
V _{lo}	0.040744
V _{to}	0.05093
V _{lw}	1.8
V _{tw}	1.84

(Fuente: Gil, 2020)

2.3 Módulo de CFD

En este módulo se realizan las simulaciones dentro de CFX-Solver partiendo de lo estipulado en el módulo de flujo junto con el funcionamiento de la aplicación hasta su post procesamiento.

2.3.1 Procesamiento

La información de todo el preprocesamiento se procesa en Solver, en esta herramienta de CFX se realizan cálculos del sistema hidrodinámico, fracción volumétrica, transmisión de energía, resolución de turbulencia y electromagnetismo para entregar resultados que son visualizados en post-procesamiento [38]. En la figura 29 se muestra el esquema del funcionamiento de CFX-Solver en la simulación de flujo en el tanque.

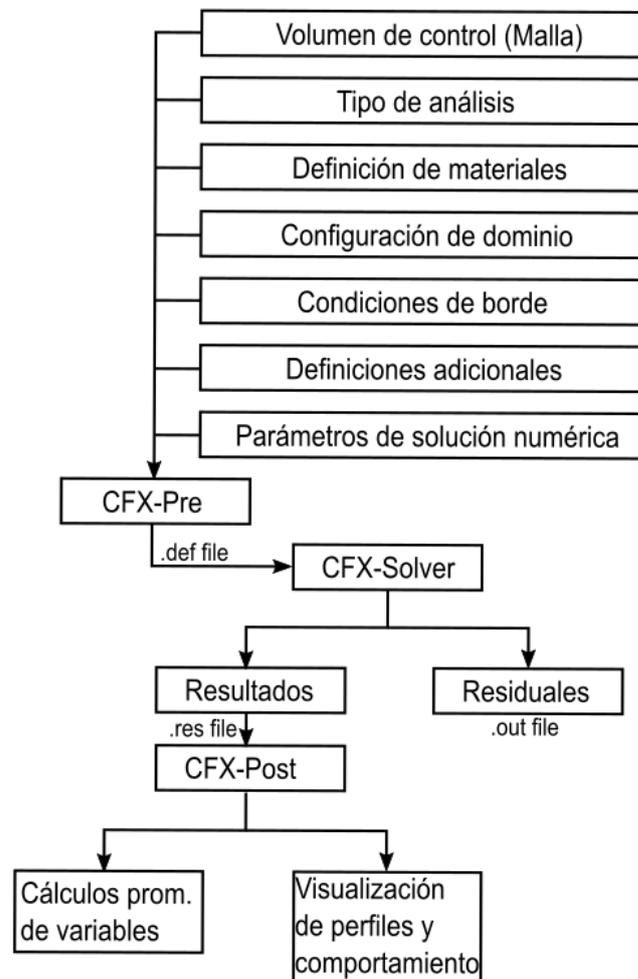


Figura 29. Desarrollo de CFX para simulación de tanque (fuente: Gil, 2020)

2.3.1.1 Criterios para calidad de la malla

La calidad de una malla es de primordial importancia para la confiabilidad de los resultados de una simulación. Para evaluar la calidad de una malla, sin importar su tipo, existen varios criterios [39] como se detalla en la tabla 24:

Tabla 24. Criterios de calidad de una malla

Criterio	Ecuación	Descripción
Y plus	$y^+ = \frac{\sqrt{\tau_w/\rho} \cdot \Delta n}{\nu}$	Es la distancia adimensional desde la pared cercana hasta cada elemento de la malla [35]. Si es < 200 es aceptable para el modelo de turbulencia K-omega SST dadas sus funciones de pared automáticas [40].
Número Omega	$\Omega = \frac{NE}{ND}$	Relaciona el número de elementos con el número de nodos de una malla, es directamente proporcional al consumo de recursos computacionales. A pesar de no tener rango en específico, se busca valores similares en las mallas analizadas de un mismo caso de estudio [39].
Número de Courant	$Co = \frac{u \cdot \Delta t}{\Delta x}$	Indicador que relaciona las variables dependientes, la dimensión de los intervalos de tiempo y la distancia entre nodos consecutivos [41]. Es fundamental para los solucionadores explícitos y no debe ser mayor a uno para la mayoría de casos [42].

(Fuente: Gil, 2020)

2.3.2 Post-procesamiento

Con los resultados de todos los cálculos del procesamiento de los datos, se procedió a realizar el post-procesamiento aplicando CFX-Post, donde se crean perfiles concernientes a variables en específico (como velocidad de flujo o fracción volumétrica), animaciones, entre otras acciones para poder compararlos con estudios previos.

2.3.2.1 Comportamiento en simulaciones 2D

En las simulaciones 2D Se corrieron con un amplio rango de velocidades obteniendo el comportamiento con respecto a los factores detallados en la tabla 25.

Tabla 25. Comportamiento en simulaciones 2D

Factor	Comportamiento
Velocidad de entrada	Al superar los 0.2 m/s en la entrada, la turbulencia del flujo no permite a las partículas de petróleo separarse a tiempo del agua y son arrastradas con ella hacia la salida inferior. Por otro lado, al tener una velocidad de entrada por debajo de los 0.2 m/s no se logra replicar la turbulencia de [3] que se desea validar. Véase el Anexo VIII
Nivel de interfase	Si el nivel de interfase supera el nivel de la ranura de entrada, las partículas de petróleo tienden a no separarse de la interfase del agua por lo que el tanque se llena de la mezcla caótica. En contraste, al estar por debajo del nivel de la entrada la turbulencia no se refleja en la simulación y el agua tiende a arrastrar el petróleo por la salida inferior. Véase el Anexo IX
Condiciones óptimas	Los resultados más cercanos al modelo en [3] se obtienen partiendo de cuando la interfase petróleo/agua se encuentra a la altura de la entrada de flujo en un estado de "equilibrio". Véase el Anexo X
Trayectoria	La mezcla sale empujando el fluido ubicado entre los platos hacia los mismos, lo que causa vórtices junto a la entrada y el comportamiento ondulado de flujo que disminuye mientras se acerca al borde del plato. Al chocar con la superficie exterior del tanque el flujo sufre una bifurcación. En la parte inferior del tanque la energía que posee el flujo se disipa en los primeros vórtices para ser atrapada por la corriente de la salida. Véase el Anexo XI

(Fuente: Gil, 2020)

2.3.2.2 Comportamiento en simulaciones 3D

Se partió desde el punto de condiciones óptimas de las simulaciones 2D utilizando una extrapolación tridimensional con respecto al eje Y dentro del solver. Al variar las velocidades se obtuvo el comportamiento de los factores tabulados en la tabla 26:

Tabla 26. Comportamiento en simulaciones 3D

Factor	Comportamiento
Velocidad de entrada	Para la visualización del fenómeno de turbulencia de las simulaciones 2D se requirió aumentar la velocidad en un intervalo relativamente grande para funcionar correctamente a los 2 m/s mostrando fallo en eficiencia (visible en isovolúmenes) en velocidades superiores y falta de vorticidad en las velocidades inferiores. Véase el Anexo XII
Trayectoria	Las simulaciones 3D muestran un flujo parecido al 2D, sin embargo, presentan una trayectoria más caótica desplazándose hacia los lados volviendo sus líneas de flujo tortuosas. La vorticidad de la parte superior del tanque es bastante reducida (visualizable en perfiles de flujo) por lo que no se divisa la misma bifurcación. Véase el Anexo XIII
Contornos	En las simulaciones 3D los perfiles de concentración de los fluidos no muestran de manera representativa el comportamiento del flujo como lo hacen las renderizaciones tridimensionales.

(Fuente: Gil, 2020)

3 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En esta sección se presentan los resultados obtenidos de las secciones de metodología junto a su comparación con [3], como se muestra en la metodología en la figura 30, con el objetivo de validar los resultados de las simulaciones.

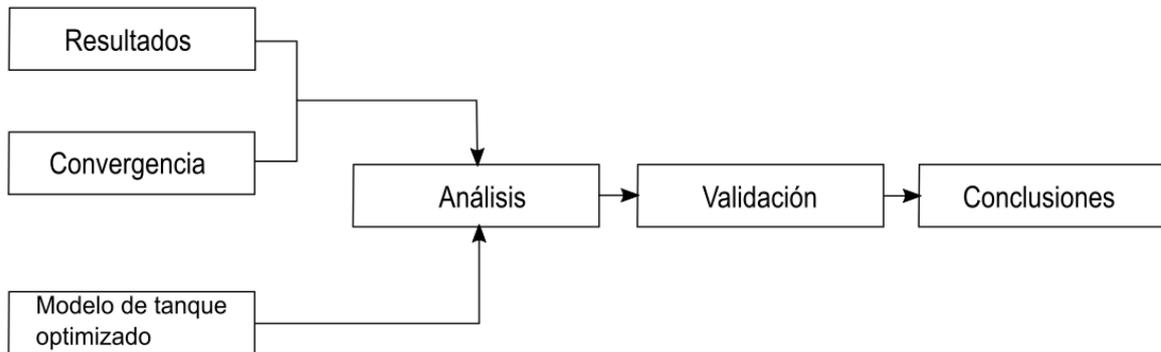


Figura 30. Metodología de validación de resultados
(Fuente: Gil, 2020)

3.1 Simulaciones 2D

Se realizaron múltiples simulaciones 2D con análisis transiente con el propósito de obtener un comportamiento de turbulencia similar al presentado en [3] junto a la evaluación de independencia de malla utilizada.

3.1.1 Independencia de malla 2D

Se utilizó varios tamaños de elemento en la generación de mallas similares para simular el flujo en cada una de ellas. Así haciendo uso de los puntos fuente de la tabla 17 (véase la figura 28) se comparó los resultados para verificar que las variables no cambien en grandes valores como se muestra en la tabla 27 donde la malla seleccionada se presenta resaltada en gris.

Para verificar la independencia de malla se ubicaron las simulaciones en el segundo 60, correspondiente a 600 pasos de tiempo desde el punto de equilibrio, y se evalúan los valores de fracción volumétrica y presión absoluta.

En la tabla 27 se muestran las fracciones volumétricas de petróleo en los puntos fuente mencionados en la tabla 17. Así se pudo evaluar el desempeño de separación de fases en el tanque con los diferentes tamaños de elemento de las mallas, demostrando independencia al mostrar valores similares a partir de la malla de 0.020 [m] (resaltada en gris). Mostrando que la parte superior del tanque no presenta fracción de agua y en la parte inferior cantidades despreciables.

Tabla 27. Fracción volumétrica de petróleo para independencia de malla

Tamaño de elemento	0.027	0.025	0.020	0.0175
Punto	Fracción volumétrica en el segundo 60			
Checkouto	1,000E+00	1,000E+00	1,000E+00	1,000E+00
Checkup	9,999E-01	1,000E+00	1,000E+00	1,000E+00
Checkul	9,997E-01	1,000E+00	9,998E-01	9,999E-01
Checkin	9,944E-01	9,891E-01	9,830E-01	9,947E-01
Checkll	2,267E-02	4,196E-03	3,496E-03	9,275E-05
Checkdown	4,325E-04	6,685E-03	1,446E-03	5,357E-05
Chckoutw	1,558E-04	1,718E-04	2,617E-04	1,416E-04

(Fuente: Gil, 2020)

En la tabla 28 se encuentran los valores de presión absoluta en el tanque. Los valores comienzan a normalizarse a partir la malla de 0.025 [m], pero varían muy poco desde la malla de 0.020m. Las diferencias entre de pascales entre mallas se dan en el orden de 10^2 ya que en la inicialización del *solver* se selecciona automáticamente un punto para establecer la presión de referencia en los parámetros de CFX-Pre, que dependiendo del tamaño de elemento cambia levemente.

Tabla 28. Presión absoluta en tanque para independencia de malla

Tamaño de elemento	0.027	0.025	0.020	0.0175
Punto	Presión absoluta [Pa] en el segundo 60			
Checkouto	3,662E+04	5,116E+04	5,287E+04	5,263E+04
Checkup	5,200E+04	6,654E+04	6,825E+04	6,801E+04
Checkul	6,311E+04	7,764E+04	7,936E+04	7,912E+04
Checkin	7,679E+04	9,133E+04	9,303E+04	9,280E+04
Checkll	9,552E+04	1,100E+05	1,118E+05	1,115E+05
Checkdown	9,552E+04	1,100E+05	1,118E+05	1,115E+05
Checkoutw	9,552E+04	1,100E+05	1,118E+05	1,115E+05

(Fuente: Gil, 2020)

Con los parámetros mostrados en las tablas 27 y 28 se demuestra la independencia de malla al no mostrar diferencias considerables en las variables evaluadas a partir de 0.020 [m] en tamaño de elemento de malla, por lo que utilizar mallas con tamaños menores solamente consumiría tiempo y recursos computacionales.

3.1.2 Parámetros del caso de estudio

Para validar la malla seleccionada se analizaron sus parámetros de calidad, que están descritos en la tabla 24. Sus valores se muestran en la tabla 30 resaltados en gris y se compararon con los parámetros de las otras mallas utilizadas.

Tabla 29. Parámetros de mallas utilizadas en simulaciones 2D

Tamaño de elemento [m]	0.027	0.025	0.020	0.0175
Parámetro				
# Nodos	99629	113405	164511	215010
# Elementos	234344	270212	409040	562637
Número omega	2.35	2.38	2.48	2.62
Número de Courant	0.262	0.828	0.286	0.288
Yplus	7.192	9.161	6.685	6.563

(Fuente: Gil, 2020)

El número omega es similar con el de las mallas comparadas por lo que es aceptable. El criterio de Yplus es mucho menor a 200, aceptable dentro de los rangos estipulados en la tabla 22 y el número de Courant tiene un valor menor a 1 indicando resultados confiables.

3.1.3 Variables residuales

En la figura 31 se muestran las variables residuales de la malla de 0.020 m de tamaño de elemento. Se puede observar bastante inestabilidad en todas las variables, esto es normal y se debe al análisis transiente realizado ya que los cálculos de las ecuaciones de flujo se realizan en intervalos de tiempo predeterminados y no automáticos. Sin embargo, estas se ubican en el orden de 10^{-3} junto a un comportamiento con tendencia de línea recta cuyos cambios se deben a la constante variación de velocidad gracias al control mencionado en la sección 2.2.1.2. En el anexo XV se muestran las variables residuales de las demás mallas.

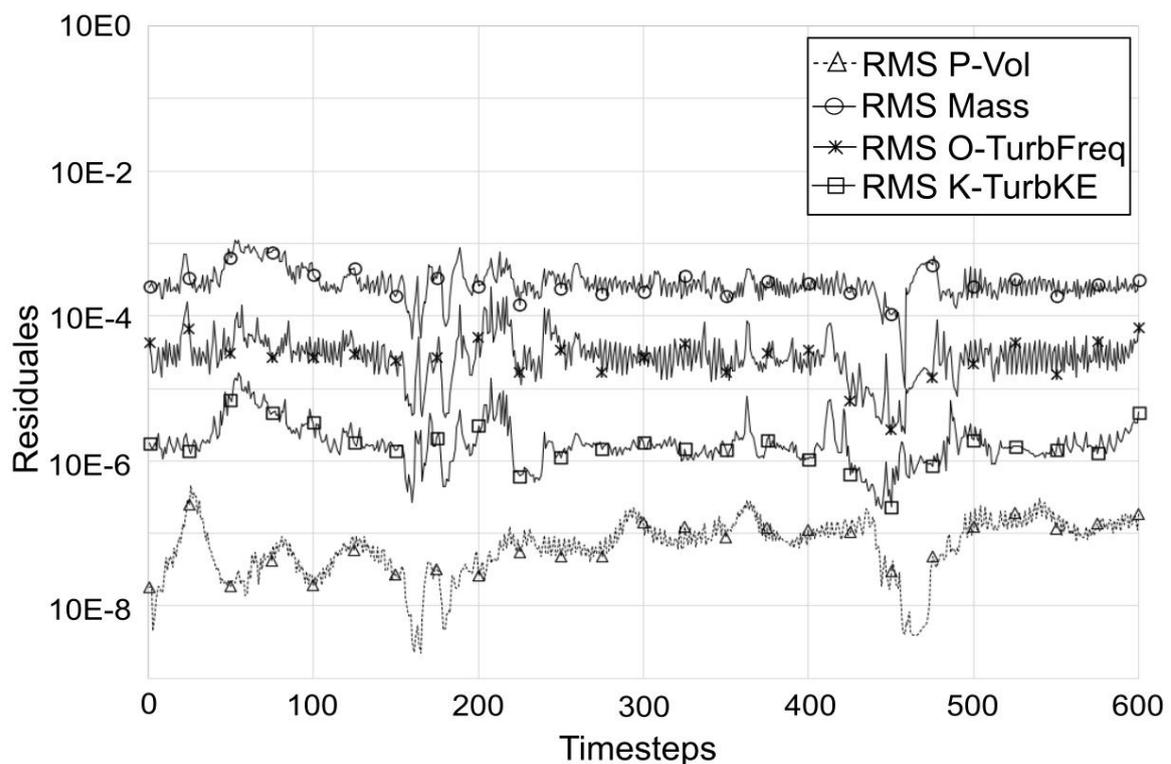


Figura 31. Variables residuales de simulación 2D
(Fuente: Gil, 2020)

3.1.4 Comparación con el modelo optimizado

A partir de la visualización de perfiles de flujo se obtuvo el comportamiento de los fluidos en el tanque en la simulación. Este comportamiento se comparó con el mostrado en [3] para verificar las similitudes en la turbulencia y capacidad.

3.1.4.1 Capacidad

La turbulencia ocasionada por las altas velocidades nos obliga a utilizar la velocidad estable en la entrada de 0.19 m/s para poder replicar el fenómeno, pero esta está muy por debajo de los 0.964 m/s necesarios para manejar un caudal neto de 10000 $m^3/día$. Como se muestra en el cálculo del anexo XIV solo permite un caudal de 1970 $m^3/día$ que representa aproximadamente 0.2 del valor del modelo de [3] indicando que el diseño 2D de [3] tiene una capacidad mayor a 3000 Bbls.

3.1.4.2 Turbulencia

Al crear perfiles de la concentración de petróleo y vectores de velocidad de flujo se obtiene un perfil muy similar al del diseño original, como se observa en la figura 32. Estas nos entregan comparaciones importantes de cómo se resuelve la turbulencia en la simulación tal como en las zonas A, B, C y D.

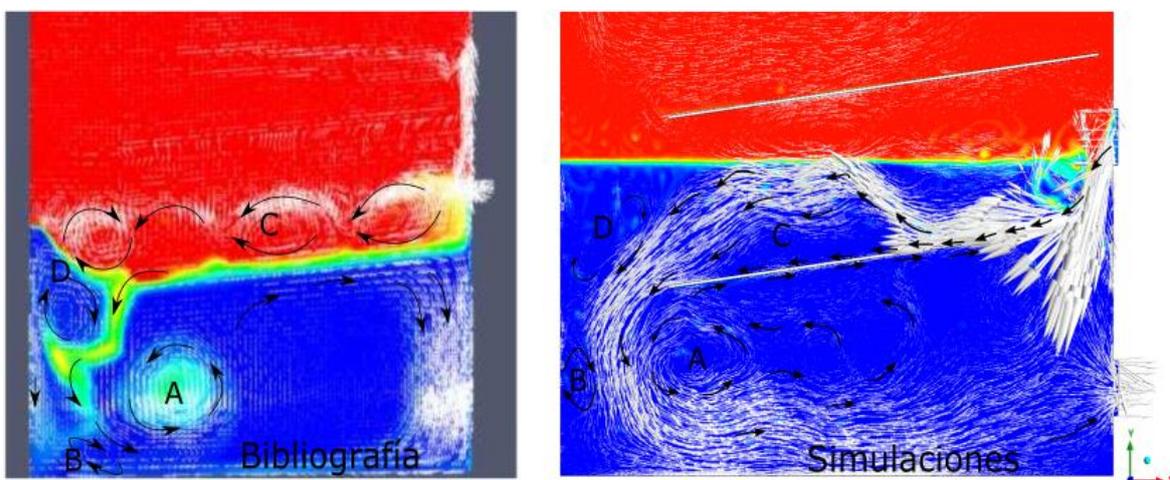


Figura 32. Perfil del tanque en [3] vs perfil + vectores de simulaciones 2D
(Fuente: Gil, 2020)

En “A” se muestra una vorticidad grande que posee la mayor cantidad de la energía que alimenta a los vórtices adyacentes. En “B” se encuentra un pequeño vórtice característico por la interacción del flujo en la base del tanque y la pared exterior, se diferencia solamente en su dilatación. En “C” se observa la primera acción de los platos coalescentes, causando que el flujo choque y se produzcan esas ondulaciones. En “D” se puede ver como la corriente al chocar con la pared da la base para la formación de los vórtices en la parte inferior del tanque.

3.1.5 Caracterización y eficiencia

Se utilizaron las herramientas de CFX-Post como Isovolumenes y renderizaciones tridimensionales para demostrar que las simulaciones muestran las características de la coalescencia y asegurar que la separación ocurre eficientemente.

3.1.5.1 Caracterización

Al renderizar los volúmenes de petróleo y agua en las fases opuestas se aprecia el fenómeno de coalescencia de las partículas que se dirigen nuevamente hacia la interfase. Esto se distingue en la cara superior del plato en la parte de arriba como se muestra en la figura 34, en la cara inferior del plato de abajo como se muestra en la figura 33 y en las partículas con poca energía remanente de la turbulencia marcadas en ambas figuras con vectores mostrando su trayectoria.

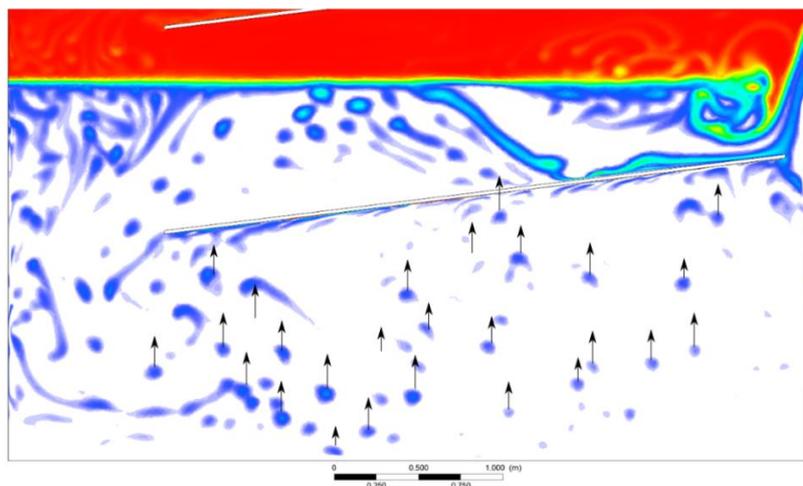


Figura 33. Renderización de volumen de petróleo de simulaciones 2D (Fuente: Gil, 2020)

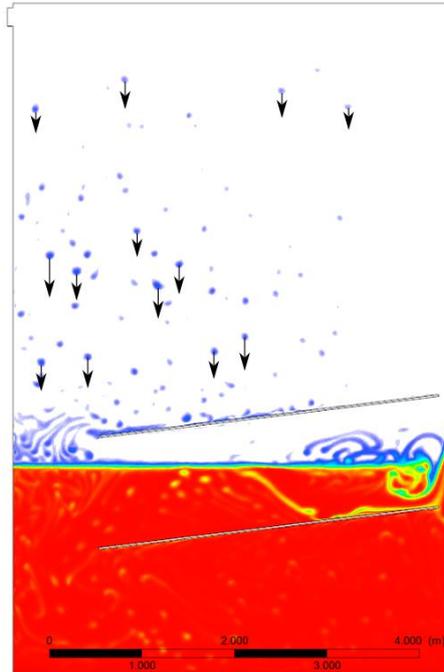


Figura 34. Renderización de volumen agua de simulaciones 2D
(Fuente: Gil, 2020)

3.1.5.2 Eficiencia

Al obtenerse un isovolumen con respecto a la fracción volumétrica del agua superior al 0.001, como se muestra en la figura 35, se demuestra la deshidratación eficiente del diseño del tanque ya que en la salida de petróleo no se presenta ningún volumen de agua por encima del 0.1% (no hay partículas azules en la salida de petróleo).

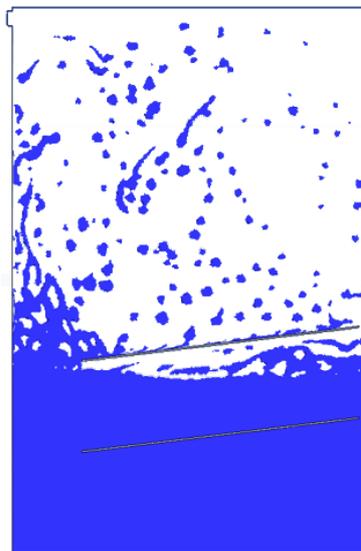


Figura 35. Isovolumen de la fracción volumétrica de agua por encima del 0.1%
(Fuente: Gil, 2020)

3.2 Simulaciones 3D

Se realizaron varias simulaciones 3D con análisis estable (véase la tabla 13) para asegurar que el comportamiento presentado en las simulaciones 2D es representativo a nivel tridimensional. Para ello se utilizaron mallas de tamaños de elementos similares. Teniendo en cuenta que al ser 3D se consumen mayores recursos computacionales, no se pueden usar exactamente los mismos tamaño de elemento que en las simulaciones 2D.

3.2.1 Parámetros del caso de estudio

Para la elección de la malla 3D se analizaron los parámetros de calidad de varios tamaños de elemento, al igual que en la sección anterior. Los valores de la malla seleccionada se muestran en la tabla 31 resaltados en gris

Tabla 30. Parámetros de mallas utilizadas en simulaciones 3D

Tamaño de elemento [m]	0.027	0.025	0.023	0.020
Parámetro				
# Nodos	823551	933442	1074066	1378040
# Elementos	2974241	3450157	4069706	5414032
Número omega	3.61	3.69	3.79	3.93
Número de Courant	1.096	1.257	1.331	1.45
Yplus	3.693	4.067	4.076	4.034

(Fuente: Gil, 2020)

El criterio de Yplus está por debajo de una decena haciéndolo aceptable dentro de los rangos estipulados en la tabla 24, el número omega presenta similitud en todas las mallas presentadas en la tabla 31 y el número de Courant, está apenas sobre los límites recomendados siendo aceptable en complemento con las variables residuales.

3.2.2 Variables residuales

En la figura 36 se presentan las variables residuales correspondientes a la malla de 0.027 [m] de tamaño de elemento. Al ser un análisis estable los RMS de presión y fracción volumétrica no muestran grandes variaciones, presentando tan solo pequeños saltos en la presión en el orden de 10^{-6} . La naturaleza caótica del flujo se ve reflejada en los saltos de la turbulencia.

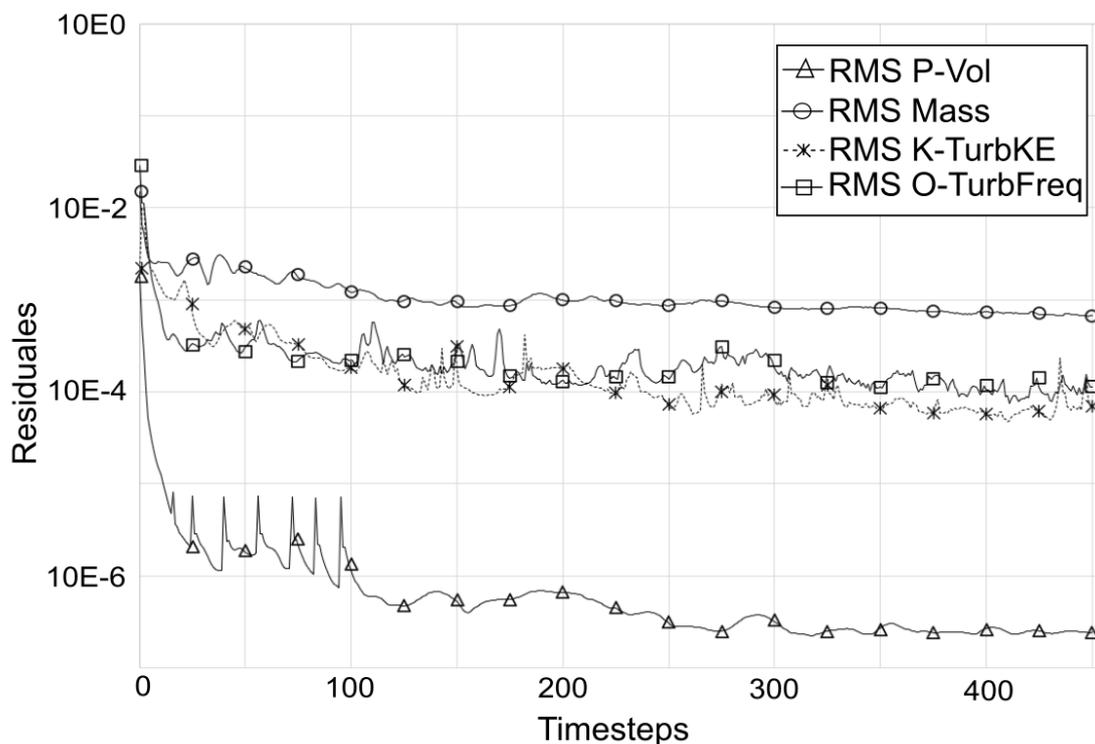


Figura 36. Variables residuales de la simulación con malla de 0.027 [m]
(Fuente: Gil, 2020)

3.2.3 Comparación con simulación 2D

Al igual que las simulaciones 2D, a partir de la visualización de perfiles de flujo se obtuvo el comportamiento de los fluidos en las simulaciones 3D y Este se comparó con el mostrado en [3] junto a las simulaciones 2D para asegurar que los resultados de las mismas son representativos.

3.2.3.1 Turbulencia

Las partículas de la mezcla entran desplazando al fluido del tanque hacia todas las direcciones por lo que el post procesamiento de la turbulencia no resultó tan obvio

como en la 2D. Sin embargo, como se muestra en la figura 37, las simulaciones 3D presentan bastante similitud con los perfiles 3D de [3].

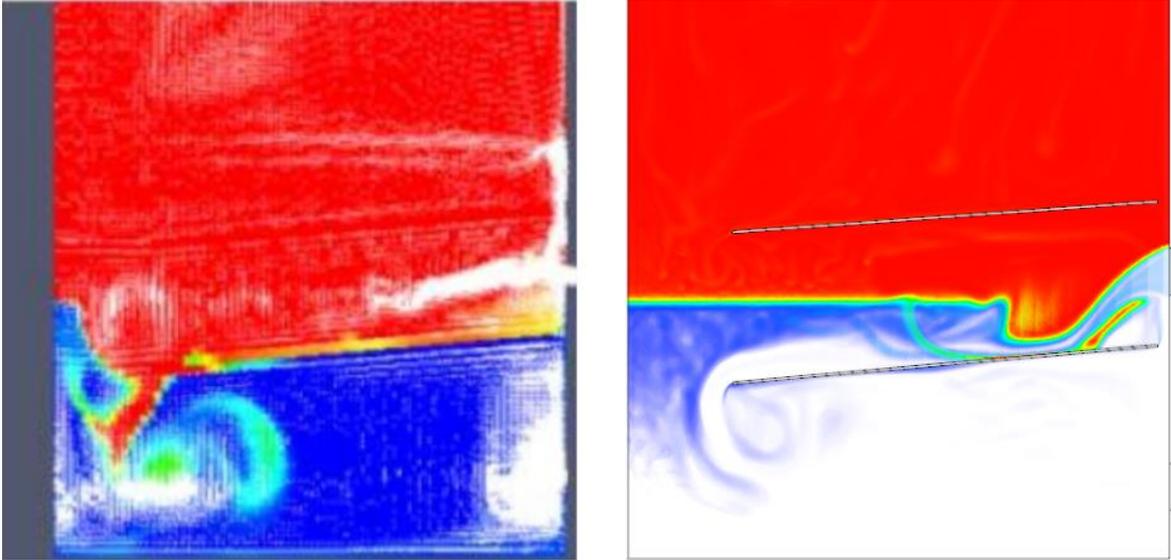


Figura 37. Perfil 3D de [3] comparado a la renderización de petróleo en 3D
(Fuente: Gil, 2020)

Al comparar las simulaciones 2D y 3D, como se muestra en la figura 38, se distinguen estas características:

- A: En las simulaciones 3D, el vórtice principal se diluye al unificarse con el vórtice que se obtiene gracias a la influencia del plato inferior.
- B: Este vórtice sigue siendo característico para ambos diseños causado por la interacción del flujo con la superficie exterior y la base del tanque
- C: Se divisan las ondulaciones típicas del flujo entre los platos, pero gracias a la nueva amplitud que adquiere gradualmente en el eje z, estas pierden intensidad.
- D: Se repite el fenómeno de choque del flujo con la pared externa del tanque causando el inicio de la cascada de energía de la turbulencia.

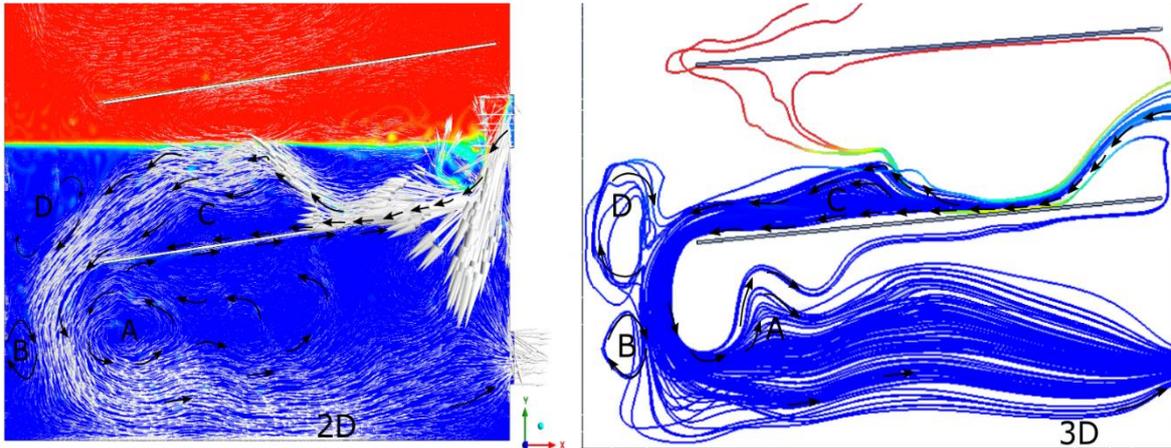


Figura 38. Comparación de turbulencia entre simulaciones 2D y 3D
(Fuente: Gil, 2020)

3.2.4 Capacidad

Al ser tridimensional, el software ya no solo considera las interacciones en el plano XY por lo que para replicar el comportamiento buscado se tuvo que aumentar la velocidad. Este diseño resultó exitoso al utilizar una velocidad de 2 m/s para poder replicar el fenómeno. Partiendo de los cálculos del anexo XVII esto representa aproximadamente **2.07** veces el valor del diseño de [3], indicando que un tanque de 3000 Bbls de capacidad podría trabajar a $20000 \text{ m}^3/\text{día}$.

3.2.5 Caracterización y eficiencia

Al igual que en las simulaciones 2D se utilizaron Isovolumenes y renderizaciones tridimensionales para demostrar que las simulaciones muestran las características de la coalescencia y asegurar la eficiencia de la separación.

3.2.5.1 Caracterización

Al renderizar el volumen de petróleo y agua, como se muestra en las figuras 39 y 40 respectivamente, el fenómeno de coalescencia se representa de manera marcada en las caras de los platos opuestas al flujo de entrada, mucho más que en el modelo 2D. Bajo el plato inferior se observan las partículas de petróleo acumulándose (figura 39) y sobre el plato superior se observan las partículas de agua regresando hacia la interfase (figura 40).

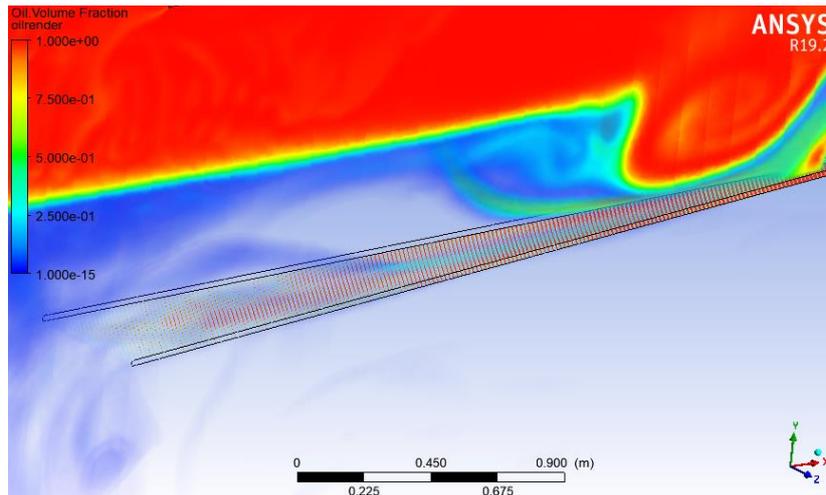


Figura 39. Renderización de volumen de petróleo en 3D
(Fuente: Gil, 2020)

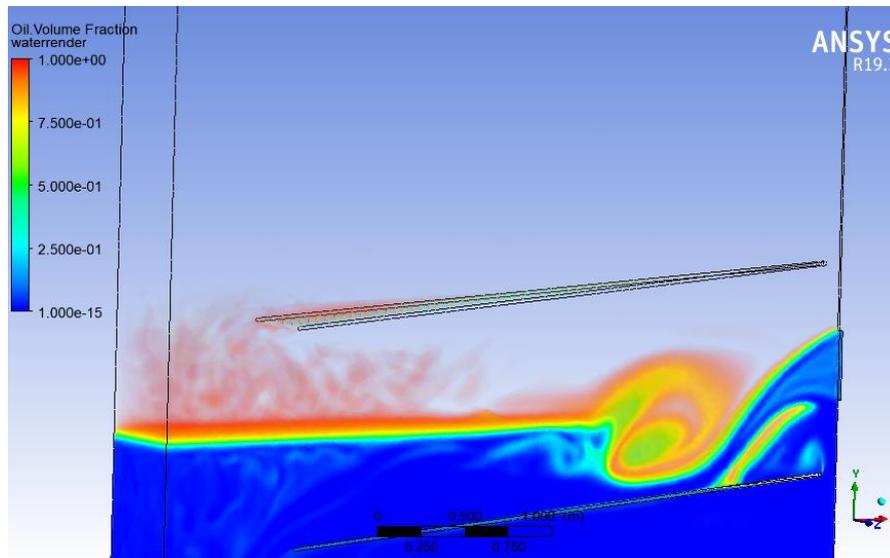


Figura 40. Renderización de volumen de agua en 3D
(Fuente: Gil, 2020)

3.2.5.2 Eficiencia

Se generaron 2 Isovólúmenes, un isovolumen de petróleo superior al 1% y un isovolumen del agua al 0.01%, como se ilustra en la figura 41, mostrando que ninguno de los fluidos escapa por la salida que no les corresponde en cantidades considerables al no iluminarse las celdas de la malla en dirección a la salida.

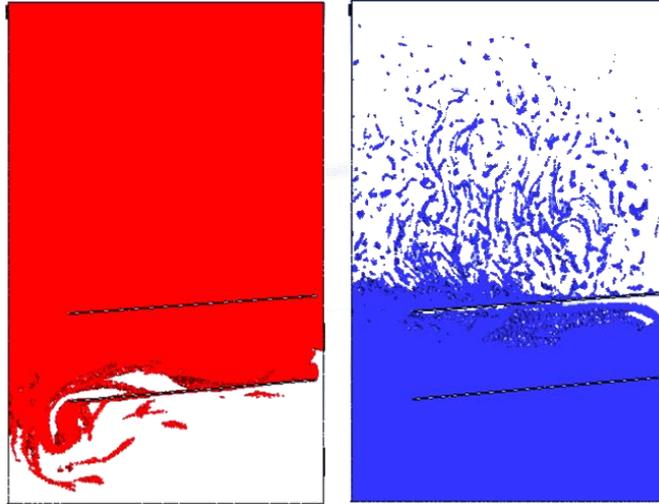


Figura 41. Isovolumenes de petróleo y agua en la simulación 3D a 2 m/s
(Fuente: Gil, 2020)

4 CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

4.1 Conclusiones

Fue posible realizar un estudio numérico dentro de ANSYS del diseño de tanque deshidratador optimizado presentado en [3], utilizando CFX y sus componentes.

Se comprobó el funcionamiento y la eficiencia del diseño de tanque deshidratador con platos coalescentes mediante la comparación visual de comportamiento de turbulencia y trayectoria entre las geometrías 3D, 2D y propuesta por la bibliografía.

Al conseguir un desempeño de separación eficiente en la simulaciones realizadas, replicando la turbulencia en el flujo utilizando el modelo K- ω SST de turbulencia y las condiciones definidas la bibliografía, se logró validar el modelo numérico de simulación de flujo en tanques deshidratadores con el que optimizaron el diseño de platos coalescentes en [3]. Respaldo los resultados por la calidad de la malla híbrida 2D utilizada junto al criterio de variables residuales.

Como resultado de las simulaciones efectuadas para este trabajo se consiguió una metodología para CFX junto con una configuración de CFX-pre mediante la cual se puede replicar fenómenos de flujo en tanques de al menos 3000 Bbls de capacidad sin recursos computacionales excesivos.

4.2 Trabajos futuros

El uso de una malla híbrida en este trabajo permite la posibilidad de un estudio de eficiencia de malla donde se podrían evaluar los cambios en los resultados al utilizar una malla estructurada de dimensiones similares. Así se puede lograr un menor consumo de recursos y se abre la posibilidad al uso geometrías más complejas en la metodología obtenida.

Siendo la geometría de las ranuras de entrada predefinida como ranuras rectangulares en este trabajo, se crea la posibilidad de analizar en una investigación

la influencia de las variaciones de la geometría de entrada en la separación de fases dentro de este tipo de tanques.

A partir de la geometría utilizada en este trabajo se puede estudiar la posibilidad de analizar el flujo con nuevos componentes adicionales en el tanque, como tuberías de entrada o paredes adicionales, para plantear un tanque optimizado de mejor funcionamiento.

Bibliografía

- [1] I. S. Revelo Merino, "Diseño de tanques usados en la separación del agua de formación para el proceso de reinyección en la estación Secoya", Tesis de grado, Universidad Central del Ecuador, Quito, Pichincha, 2015.
- [2] J. C. Fierro Cisneros, "Clarificación de agua de producción para su inyección o reinyección por flotación inducida con microburbujas", Tesis de grado, Escuela Politécnica Nacional, Quito, Pichincha, 2006.
- [3] G. Mognol, M. Raviculé, D. E. Ramajo, N. M. Nigro, S. Marquez y J. M. Giménez, «Optimización de tanques de separación de agua libre mediante CFD,» *Mecánica Computacional Vol XXXV*, pp. 163-174, 2017.
- [4] Agencia de Regulación y Control Hidrocarburífero, «Producción de campo anual 2010-2019,» ARCH, Quito, 2019.
- [5] Banco Central del Ecuador, «documentos síntesis del Banco Central el Ecuador,» [En línea]. Disponible en: <https://sintesis.bce.fin.ec/BOE/OpenDocument/1602171408/OpenDocument/.opendoc/openDocument.faces?loginSuccessful=true&shareId=4>.
- [6] R. Orfaith, «Primicias EC - Diario Digital,» 2020. [En línea]. Disponible en: <https://www.primicias.ec/noticias/economia/gobierno-reconoce-afectaciones-ambientales-ruptura-oleoductos/>.
- [7] S. Marfisi y J. L. Salager, *Deshidratación del crudo principios y tecnología*, Venezuela, Módulo de enseñanza, Universidad de los Andes - Escuela de Ingeniería Química, 2004.
- [8] M. Dixon y B. Hillaby, «ESD Simulation Training,» 21 Septiembre 2015. [En línea]. Disponible en: <https://www.esd-simulation.com/blog/summer-series-part-1>.
- [9] L. A. Laurens Arredondo, «Normas Internacionales de Diseño de Recipientes a Presión: Comparación de Procedimientos Para Determinación de Espesor Mínimo requerido,» *Universidad, Ciencia y Tecnología*, vol. 23, nº 90, pp. 72-80, Febrero 2019.

- [10] American Petroleum Institute, API ESTANDARD 650, Washington D.C.: API Publishing services, 2012.
- [11] American Petroleum Institute, Diseño y construcción de tanques grandes, soldados de tanques de almacenamiento de petróleo de baja presión, Décima ed., Washington D.C.: API Publishing Services, 2002.
- [12] American National Standards Institute, Addenda to ASME/ANSI B96.1-1986: Welded Aluminum-alloy Storage Tanks, American Society of Mechanical Engineers, 1989.
- [13] American Petroleum Institute, API 12D Especificación de campo para tanque soldados de almacenamiento de líquidos de producción, Undécima ed., Washington D.C.: API Publishing Services, 2009.
- [14] American Petroleum Institute, API 12F Especificación de compra para tanques soldados para almacenamiento de líquidos de producción, Onceava ed., Washington D.C.: API Publishing Services, 1994.
- [15] T. F. Tadros, Emulsion formation, stability, and rheology, Primera ed., T. F. Tadros, Ed., New Jersey: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2013, p. 1.
- [16] A. O. Flores Barajau, "Conversión de tanques de almacenamiento de aceite en tanques gun barrel para deshidratación y desalado de crudo pesado", Tesis de grado, UNAM Universidad Nacional Autónoma de México, México D.F., 2010.
- [17] G. K. Batchelor, Introducción a la dinámica de fluidos, Cambridge: Cambridge University Press Syndicate, 1998.
- [18] D. Valenzuela Z., «fisic.ch,» [En línea]. Disponible en: <https://www.fisic.ch/contenidos/cinemática-rotacional/aceleración-centrípeta/>.
- [19] Schlumberger, «Schlumberger Oilfield Glossary,» [En línea]. Disponible en: <https://www.glossary.oilfield.slb.com/es/Terms/c/coalescence.aspx>.
- [20] P. G. Hewitt, Física Conceptual, Décima ed., A. Black, Ed., San Francisco, California: Pearson Education, 2007.

- [21] N. Connor, «Thermal Engineering,» 12 Septiembre 2019. [En línea]. Disponible en: <https://www.thermal-engineering.org/es/que-es-la-dinamica-de-fluidos-definicion/>.
- [22] X. O. Olivella y C. A. de Saracíbar Bosch, Mecánica de medios contínuos para ingenieros, Segunda ed., Barcelona, Cataluña: Universidad Politécnica de Cataluña, 2002.
- [23] R. L. Mott, Mecánica de fluidos, Sexta ed., Pearson academic, 2006.
- [24] SIMSCALE, «SimWiki,» 2020. [En línea]. Disponible en: <https://www.simscale.com/docs/content/simwiki/cfd/what-is-laminar-flow.html>.
- [25] SIMSCALE, «SimWiki,» 2020. [En línea]. Disponible en: <https://www.simscale.com/docs/content/simwiki/cfd/what-is-turbulent-flow.html>.
- [26] L. F. Richardson, Weather prediction by numerical process, segunda ed., Cambridge: Cambridge Mathematical Press, 1922.
- [27] M. Cerrolaza, “El método de los elementos finitos para ingeniería y ciencias aplicadas: teoría y programas”, Tesis de grado, Universidad Central de Venezuela, Caracas, Venezuela, 2007.
- [28] J. D. Anderson Jr., Computational Fluid Dynamics: The Basics with Applications, J. J. Corrigan y E. Castellano, Edits., College Park, Maryland: McGraw-Hill Inc., 1995.
- [29] S. Laín Beatove, «La simulación numérica en problemas de ingeniería,» *El Hombre Y La Máquina*, nº 44, pp. 5-6, 2014.
- [30] Parabajinkya, «Slideshare.net,» 3 Julio 2012. [En línea]. Disponible en: <https://www.slideshare.net/parabajinkya0070/introduction-to-cfd>.
- [31] S. Gómez González, “Mallado y simulación CFD de automóvil”, Trabajo final de Master, Escuela técnica Superior de Ingeniería Industrial de Barcelona, Barcelona, España, 2017.
- [32] J. M. Tizón Pulido, «Universidad Politécnica de Madrid,» [En línea]. Disponible en:

http://webservice.dmt.upm.es/zope/DMT/Members/jmtizon/libre-eleccion/curso_actual/30_Mallas.pdf.

- [33] P. Chassaing, Turbulencia en Mecánica de Fluidos, 2000.
- [34] W. Frei, «COMSOL,» 6 Julio 2017. [En línea]. Disponible en: <https://www.comsol.com/blogs/which-turbulence-model-should-choose-cfd-application/>.
- [35] ANSYS, Inc., «CFX Theory,» Tokyo, 2011.
- [36] M. Kuron, «engineering.com,» 6 Junio 2015. [En línea]. Disponible en: <https://www.engineering.com/DesignSoftware/DesignSoftwareArticles/ArticleID/9296/3-Criteria-for-Assessing-CFD-Convergence.aspx>.
- [37] V. H. Gonza Sánchez, “Diseño y cálculo de un Tanque Para Almacenamiento de Petróleo Para 3000 Bbls”, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Riobamba, Chimborazo, 2014.
- [38] A. Tassone, «ResearchGate,» 06 2019. [En línea]. Disponible en: https://www.researchgate.net/figure/CFX-solver-algorithm_fig43_334050597.
- [39] G. A. Suarez Aguirre y A. D. Díaz Gadway, “Estudio numérico del flujo cavitativo alrededor de un venturi y un hidroálabe plano convexo con un obstáculo semicircular”, Tesis de grado, Escuela Politécnica Nacional, Quito, Pichincha, 2019.
- [40] F. Zandi Goharrizi, «Online CFD-Forums,» 10 Enero 2010. [En línea]. Disponible en: <https://www.cfd-online.com/Forums/cfx/71606-yplus-sst.html>.
- [41] Udvavisk, «Udvavisk.com,» 2019. [En línea]. Disponible en: <https://www.udvavisk.com/significance-courant-number/>.
- [42] R. A. C. Moritz, «Norwegian University of Science and Technology,» 2014. [En línea]. Disponible en: <https://core.ac.uk/download/pdf/52098716.pdf>.
- [43] A. M. Gallego López y O. A. Torres Mercado, “Diseño de un Gun Barrel transportable para procesamiento de 1000 BPD de emulsión”, Tesis de grado, Fundación Universitaria Los Libertadores, Bogotá, Cundinamarca, 2017.

- [44] J. Welty, G. L. Rorrer y D. G. Foster, Fundamentos de momento, calor y transferencia de masa 6ta edición revisada, Wiley, 2014, pp. 30-31.
- [45] Banco Mundial, «datos.bancomundial.org,» 2017. [En línea]. Disponible en: https://datos.bancomundial.org/indicador/NY.GDP.PETR.RT.ZS?name_desc=false.
- [46] J. Tu, G. H. Yeoh y C. Liu, Computational fluid dynamics: a practical approach, Melbourne: Elsevier, 2007.

ANEXOS

Anexo I. Cálculo de proporciones del diseño original

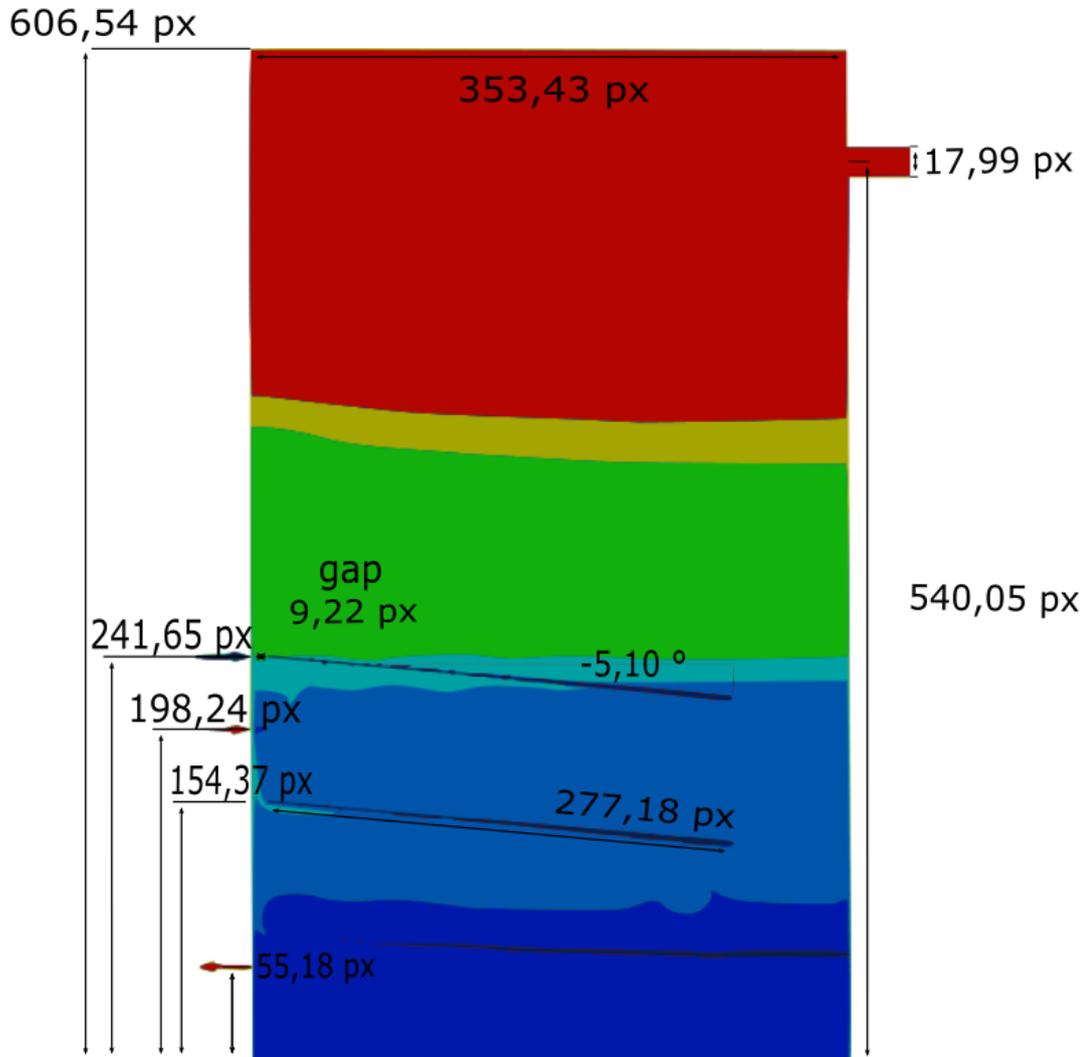


figura 42. Dimensiones digitales para el diseño

Proporciones con respecto a la altura

- Altura/Diámetro

$$\frac{606.54}{2 \cdot 353.43} = 0.85807$$

- Outlet de agua

$$\frac{55.18}{606.54} = 0.09097$$

- Plato coalescente inferior

$$\frac{154.37}{606.54} = 0.25451$$

- Inlet

$$\frac{198.24}{606.54} = 0.32684$$

- Plato coalescente superior

$$\frac{241.65}{606.54} = 0.39840$$

- Outlet de petróleo

$$\frac{540.05}{606.54} = 0.89038$$

Proporciones con respecto al radio

- Longitud del ancho

$$L = 2 \cdot r = 2 \cdot 353.43 = 706.86$$

- Gap de los platos

$$\frac{9.22}{353.43} = 0.02609$$

- Platos coalescentes

$$\cos(5.1^\circ) = \frac{l_{\text{plato}}}{l_{\text{plato inclinada}}} \rightarrow l_{\text{plato}} = \cos(5.1^\circ) \cdot 272.93 = 271.85$$

$$\rightarrow \frac{271.85}{353.43} = 0.77$$

Anexo II. Tabla a1-b (API-650) de capacidades + proporción altura/diámetro para tanques con láminas de 72 pulgadas

columna 1	columna 2	láminas de 72 in									
		columna 3	columna 4	columna 5	columna 6	columna 7	columna 8	columna 9	columna 10	columna 11	
		12	18	24	30	36	42	48	54	60	
Diámetro del tanque (ft)	Capacidad por ft de altura (Bbl)	Altura del tanque (ft) / Número de anillos en tanque completo									
2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
10	14	170	250	335	420	505	-	-	-	-	
15	31,5	380	565	755	945	1130	-	-	-	-	
20	28,3	670	1010	1340	1680	2010	2350	2690	-	-	
25	44,2	1050	1570	2100	2620	3150	3670	4200	4720	5250	
30	63,6	1510	2270	3020	3780	4530	5290	6040	6800	7550	
35	86,6	2060	3080	4110	5140	6710	7200	8230	9250	10280	
40	113	2690	4030	5370	6710	8060	9400	10740	12100	13430	
45	143	3400	5100	6800	8500	10200	11900	13600	15300	17000	
50	177	4200	6300	8400	10500	12600	14700	16800	18900	21000	
60	254	6040	9060	12100	15110	18130	21150	24190	27220	28260	
70	346	8230	12340	16450	20580	24700	28800	32930	30970	-	
80	452	10740	16120	21500	26880	32260	37600	35810	-	-	
90	573	13600	20400	27220	34030	40820	40510	-	-	-	
100	707	16800	25200	33600	42000	48400	-	-	-	-	
120	1018	24190	36290	48380	58480	-	-	-	-	-	
140	1385	32930	49350	65860	-	-	-	-	-	-	
160	1810	43000	64510	74600	-	-	-	-	-	-	
180	2290	54430	81650	-	-	-	-	-	-	-	
200	2827	67200	100800	-	-	-	-	-	-	-	
220	3421	81310	102830	-	-	-	-	-	-	-	

Anexo III. Tabla a3-b (API-650) de capacidades + proporción altura/diámetro para tanques con láminas de 96 pulgadas

láminas de 96 in									
columna 1	columna 2	columna 3	columna 4	columna 5	columna 6	columna 7	columna 8	columna 9	
Diámetro del tanque (ft)	Capacidad por ft de altura (Bbl)	Altura del tanque (ft) / Número de anillos en tanque completo							
		16	24	32	40	48	56	64	8
		2	3	4	5	6	7	8	
10	14	225	335	450	-	-	-	-	-
15	31,5	505	755	1010	1260	-	-	-	-
20	28,3	900	1340	1790	2240	2690	-	-	-
25	44,2	1400	2100	2800	3500	4200	4900	5600	6400
30	63,6	2020	3020	4030	5040	6040	7050	8060	9070
35	86,6	2740	4110	5480	6850	8230	9600	10980	12360
40	113	3580	5370	7160	8950	10740	12540	14340	16140
45	143	4530	6800	9060	11340	13600	15880	18140	20400
50	177	5600	8400	11200	14000	16800	19600	22400	25200
60	254	8060	12100	16130	20160	24190	28220	32250	36280
70	346	10960	16450	21950	27440	32930	38420	43910	49400
80	452	14320	21500	28670	35840	43010	50180	57350	64520
90	573	18130	27220	36290	45360	54530	63700	72870	82040
100	707	22380	33600	44800	-	-	-	-	-
120	1018	32250	48380	54200	-	-	-	-	-
140	1385	43900	65860	-	-	-	-	-	-
160	1810	57340	74600	-	-	-	-	-	-
180	2290	72570	-	-	-	-	-	-	-
200	2827	89600	-	-	-	-	-	-	-
220	3421	108410	-	-	-	-	-	-	-

Anexo IV. Obtención de ecuaciones para control de nivel

Para manejar el nivel de altura de la interfase en el tanque se simuló el control de salida de fluidos con el aumento de proporción de salida del agua cuando el nivel sube, es decir, las salidas de fluido comienzan a trabajar considerando un Bsw ficticio de 0.92 en lugar de 0.90. Esto permite que el funcionamiento del tanque se simule correctamente a como en la industria. Para esto se utilizaron expresiones dentro de CFX-pre y un punto fuente que representa arbitrariamente el punto del nivel de interfase con respecto a la altura.

Analizando el flujo en el tanque con respecto a la ley de continuidad, lo que entra es igual a lo que sale:

$$Q_{in} = Q_{out} \quad (12)$$

$$Q_{bruto} = Q_{oil} + Q_{water} \quad (13)$$

Sabemos que:

$$Q = velocidad \cdot \text{Área} \quad (14)$$

Obtenemos:

$$v_{in} \cdot A_{in} = v_{oil} \cdot A_{oil} + v_{water} \cdot A_{water} \quad (15)$$

Mientras la separación sea eficiente, se trabaja con la fracción de agua y petróleo en la mezcla para determinar la velocidad de salida en los outlets, entonces:

Considerando la fracción volumétrica de agua o de petróleo

$$(1 - B_{sw}) \cdot Q_{in} = Q_{oil} \quad (16)$$

O

$$B_{sw} \cdot Q_{in} = Q_{water} \quad (17)$$

Resultando en:

$$0.1 \cdot v_{in} \cdot A_{in} = v_{oil} \cdot A_{oil} \quad (18)$$

$$0.9 \cdot v_{in} \cdot A_{in} = v_{water} \cdot A_{water} \quad (19)$$

Se obtiene un sistema con 2 ecuaciones, una que relaciona la entrada total de la mezcla y otra que relaciona la proporción de cada elemento en la mezcla:

$$\begin{cases} v_{in} \cdot A_{in} = v_{oil} \cdot A_{oil} + v_{water} \cdot A_{water} \\ 0.1 \cdot v_{in} \cdot A_{in} = v_{oil} \cdot A_{oil} \end{cases} \quad (20)$$

Finalmente se establece un segundo sistema para simular el control automatizado de nivel previamente mencionado

$$\begin{cases} v_{in} \cdot A_{in} = v_{oil} \cdot A_{oil} + v_{water} \cdot A_{water} \\ 0.08 \cdot v_{in} \cdot A_{in} = v_{oil} \cdot A_{oil} \end{cases} \quad (21)$$

Anexo V. Cálculo de velocidad de entrada al diseño

Velocidad de entrada requerida

Según el modelo numérico ya mencionado [3] el caudal bruto de flujo que maneja el tanque por día es de 10000 m³ por día. Este valor lo ajustamos según el área que dispone el inlet. Al ser una modelación en 2D se maneja una sola entrada de fluido al tanque, como se indica en la sección de diseño, se tienen 15 inlets de 40 cm de altura y 2 cm de ancho equivalente a un área de 80 cm² o 0.008 m² por cada ranura. Resultando:

$$Q = v \cdot A \Rightarrow v = \frac{Q}{A} = \frac{10000 \frac{m^3}{día}}{0.008 m^2}$$

Si

$$10000 \frac{m^3}{día} \times \frac{1 día}{24 horas} \times \frac{1 hora}{60 min} \times \frac{1 min}{60 seg} = 0.11574074074074 \approx 0.1157 \frac{m^3}{s}$$

Pero siendo 15 ranuras de entrada en el diseño:

$$\frac{0.1157 \frac{m^3}{s}}{15} = 0.0077133333333333 \frac{m^3}{s} = 0.007713 \frac{m^3}{s}$$

Entonces:

$$v = \frac{Q}{A} = \frac{0.007713 \frac{m^3}{s}}{0.008 m^2} = 0.96416666666 \frac{m}{s} \approx 0.96417 \frac{m}{s}$$

Anexo VI. Cálculo de las velocidades en los puntos propuestos y de equilibrio (2D)

Velocidad de flujo propuesta

Velocidad de entrada = 0.964 m/s

Primer sistema:

$$\begin{cases} v_{in} \cdot A_{in} = v_{oil} \cdot A_{oil} + v_{water} \cdot A_{water} \\ 0.1 \cdot v_{in} \cdot A_{in} = v_{oil} \cdot A_{oil} \end{cases}$$

$$\rightarrow \begin{cases} 0.964 \cdot 0.02 \cdot 0.4 = v_{oil} \cdot 0.02 \cdot 0.2 + v_{water} \cdot 0.02 \cdot 0.4 \\ 0.1 \cdot 0.964 \cdot 0.02 \cdot 0.4 = v_{oil} \cdot 0.02 \cdot 0.2 \end{cases}$$

Se obtiene:

Velocidad máxima de salida del petróleo (vto)= 0.1928 m/s

Velocidad mínima de salida del agua (vlw)= 0.8676 m/s

Denotamos la velocidad del petróleo como negativa ya que en el sistema de referencia del programa la salida del petróleo apunta hacia -x.

Segundo sistema:

$$\begin{cases} v_{in} \cdot A_{in} = v_{oil} \cdot A_{oil} + v_{water} \cdot A_{water} \\ 0.08 \cdot v_{in} \cdot A_{in} = v_{oil} \cdot A_{oil} \end{cases}$$

$$\rightarrow \begin{cases} 0.964 \cdot 0.02 \cdot 0.4 = v_{oil} \cdot 0.02 \cdot 0.2 + v_{water} \cdot 0.02 \cdot 0.4 \\ 0.08 \cdot 0.964 \cdot 0.02 \cdot 0.4 = v_{oil} \cdot 0.02 \cdot 0.2 \end{cases}$$

Se obtiene:

Velocidad mínima de salida del petróleo (vlo)= 0.15424 m/s

Velocidad máxima de salida del agua (vtw)= 0.88688 m/s

Punto de referencia para el cambio de velocidades: (-4.6 ; 2.3 ; 0)

Velocidad de flujo estable

Velocidad de entrada = 0.19 m/s

Primer sistema:

$$\rightarrow \begin{cases} 0.19 \cdot 0.02 \cdot 0.4 = v_{oil} \cdot 0.02 \cdot 0.2 + v_{water} \cdot 0.02 \cdot 0.4 \\ 0.1 \cdot 0.19 \cdot 0.02 \cdot 0.4 = v_{oil} \cdot 0.02 \cdot 0.2 \end{cases}$$

Se obtiene:

Velocidad máxima de salida del petróleo (v_{to})= 0.038 m/s

Velocidad mínima de salida del agua (v_{lw})= 0.171 m/s

Segundo sistema:

$$\rightarrow \begin{cases} 0.19 \cdot 0.02 \cdot 0.4 = v_{oil} \cdot 0.02 \cdot 0.2 + v_{water} \cdot 0.02 \cdot 0.4 \\ 0.08 \cdot 0.19 \cdot 0.02 \cdot 0.4 = v_{oil} \cdot 0.02 \cdot 0.2 \end{cases}$$

Se obtiene:

Velocidad mínima de salida del petróleo (v_{lo})= 0.0304 m/s

Velocidad máxima de salida del agua (v_{tw})= 0.1748 m/s

Punto de referencia: (-4.6 ; 2.3 ; 0)

Anexo VII. Cálculo de las velocidades en los puntos propuestos y de equilibrio (3D)

Velocidad de flujo propuesta

Velocidad de entrada = 0.964 m/s

Primer sistema:

$$\rightarrow \begin{cases} 0.964 \cdot 0.02 \cdot 0.4 = v_{oil} \cdot \pi \cdot 0.1^2 + v_{water} \cdot 0.02 \cdot 0.4 \\ 0.1 \cdot 0.964 \cdot 0.02 \cdot 0.4 = v_{oil} \cdot \pi \cdot 0.1^2 \end{cases}$$

Se obtiene:

Velocidad máxima de salida del petróleo (vto)= 0.024548 m/s

Velocidad mínima de salida del agua (vlw)= 0.8676 m/s

Segundo sistema:

$$\rightarrow \begin{cases} 0.964 \cdot 0.02 \cdot 0.4 = v_{oil} \cdot \pi \cdot 0.1^2 + v_{water} \cdot 0.02 \cdot 0.4 \\ 0.08 \cdot 0.964 \cdot 0.02 \cdot 0.4 = v_{oil} \cdot \pi \cdot 0.1^2 \end{cases}$$

Se obtiene:

Velocidad mínima de salida del petróleo (vlo)= 0.019638 m/s

Velocidad máxima de salida del agua (vtw)= 0.88688 m/s

Punto de referencia para el cambio de velocidades: (-4.6 ; 2.3 ; 0)

Velocidad de flujo estable

Velocidad de entrada = 2 m/s

Primer sistema:

$$\rightarrow \begin{cases} 2 \cdot 0.02 \cdot 0.4 = v_{oil} \cdot \pi \cdot 0.1^2 + v_{water} \cdot 0.02 \cdot 0.4 \\ 0.1 \cdot 2 \cdot 0.02 \cdot 0.4 = v_{oil} \cdot \pi \cdot 0.1^2 \end{cases}$$

Se obtiene:

Velocidad máxima de salida del petróleo (vto)= 0.05093m/s

Velocidad mínima de salida del agua (vlw)= 1.8 m/s

Segundo sistema:

$$\rightarrow \begin{cases} 2 \cdot 0.02 \cdot 0.4 = v_{oil} \cdot \pi \cdot 0.1^2 + v_{water} \cdot 0.02 \cdot 0.4 \\ 0.08 \cdot 2 \cdot 0.02 \cdot 0.4 = v_{oil} \cdot \pi \cdot 0.1^2 \end{cases}$$

Se obtiene:

Velocidad mínima de salida del petróleo (v_{lo})= 0.040744 m/s

Velocidad máxima de salida del agua (v_{tw})= 1.84 m/s

Anexo VIII. Comportamiento de simulación 2D con respecto a la velocidad de entrada

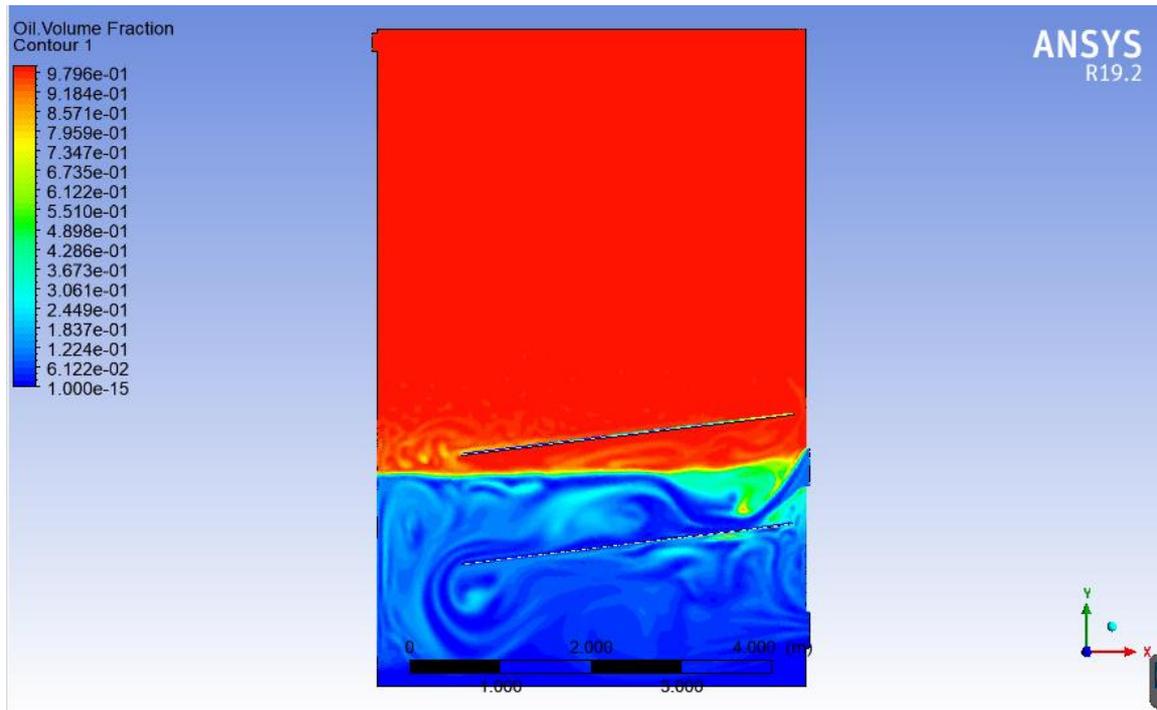


Figura 43. Velocidad de entrada superior a los 0.2 m/s
(Fuente: Gil, 2020)

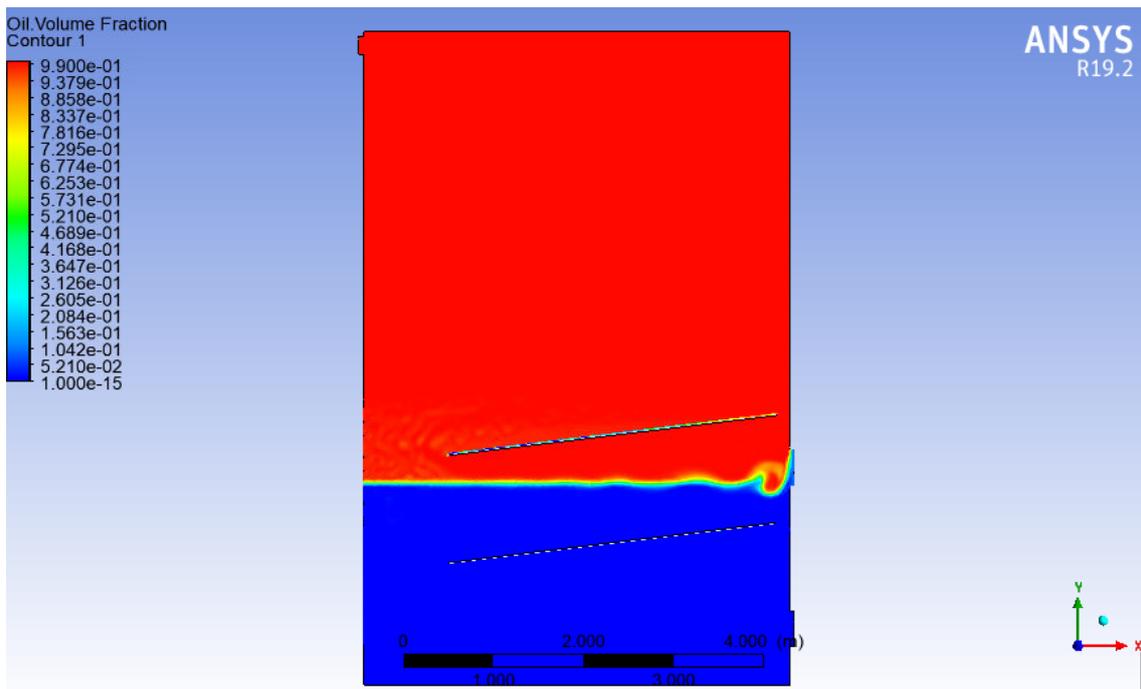


Figura 44. Velocidad de entrada inferior a los 0.2 m/s
(Fuente: Gil, 2020)

Anexo IX. Comportamiento de simulación 2D con respecto al nivel de interfase

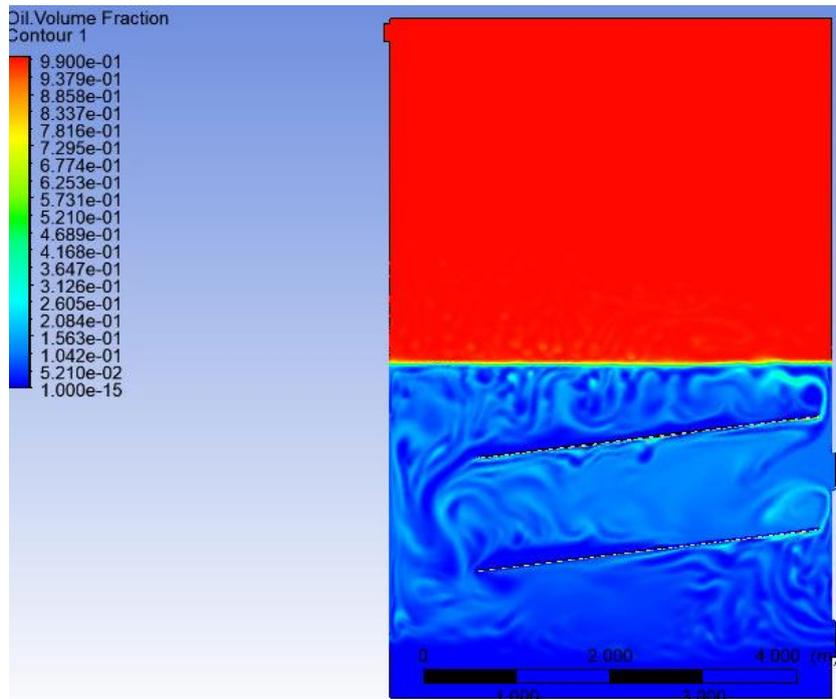


Figura 45. Turbulencia con el nivel de interfase por encima de entrada
(Fuente: Gil, 2020)

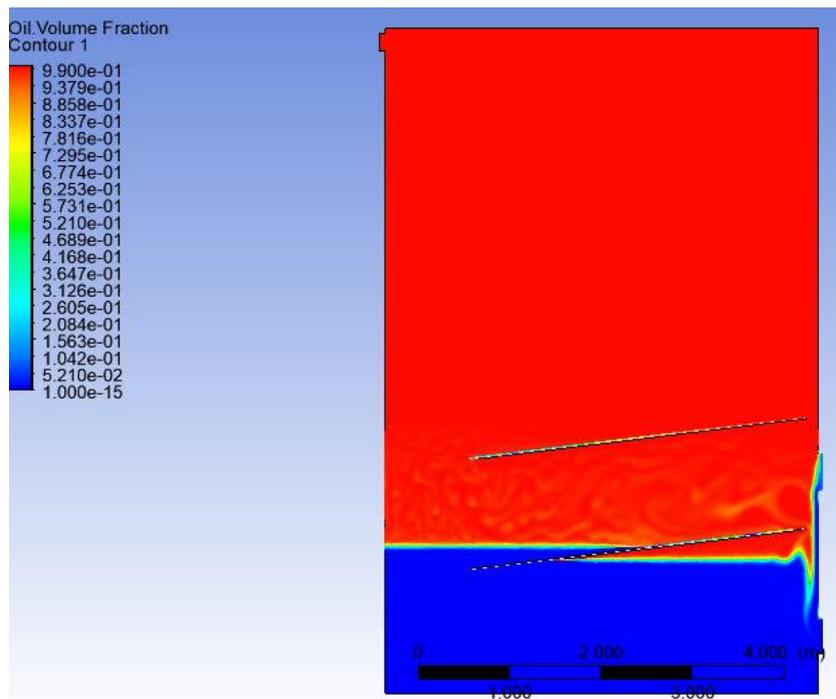
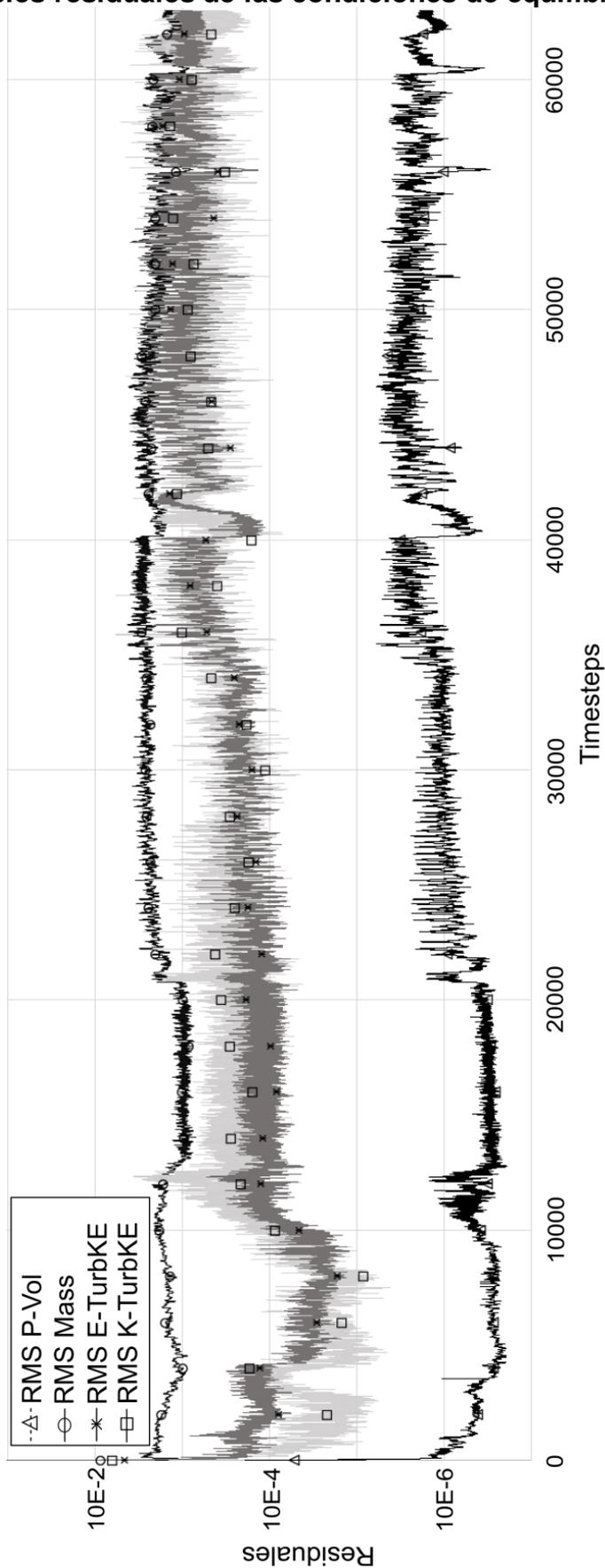


Figura 46. Turbulencia con el nivel de interfase por debajo de entrada
(Fuente: Gil, 2020)

Anexo X. Variables residuales de las condiciones de equilibrio



Anexo XI. Trayectoria en simulaciones 2D

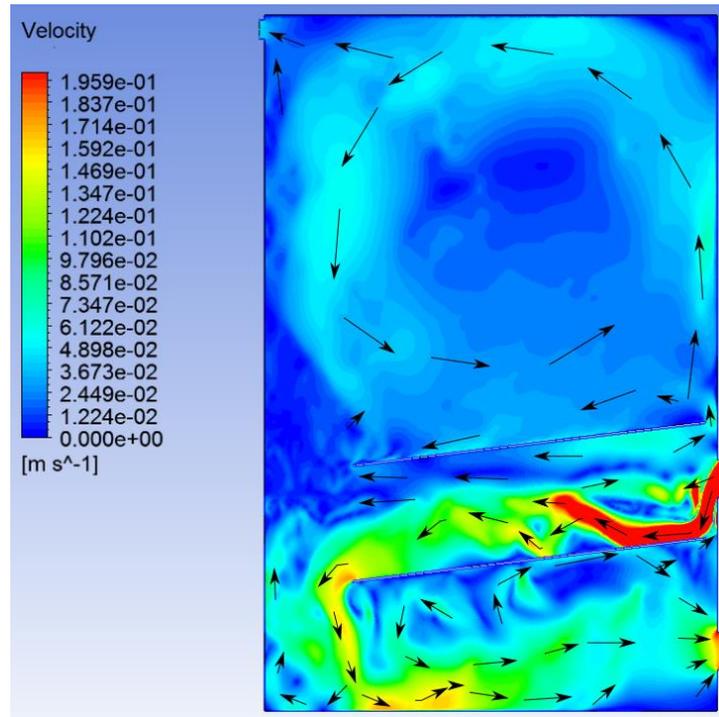


Figura 47. Trayectoria en simulaciones 2D
(Fuente: Gil, 2020)

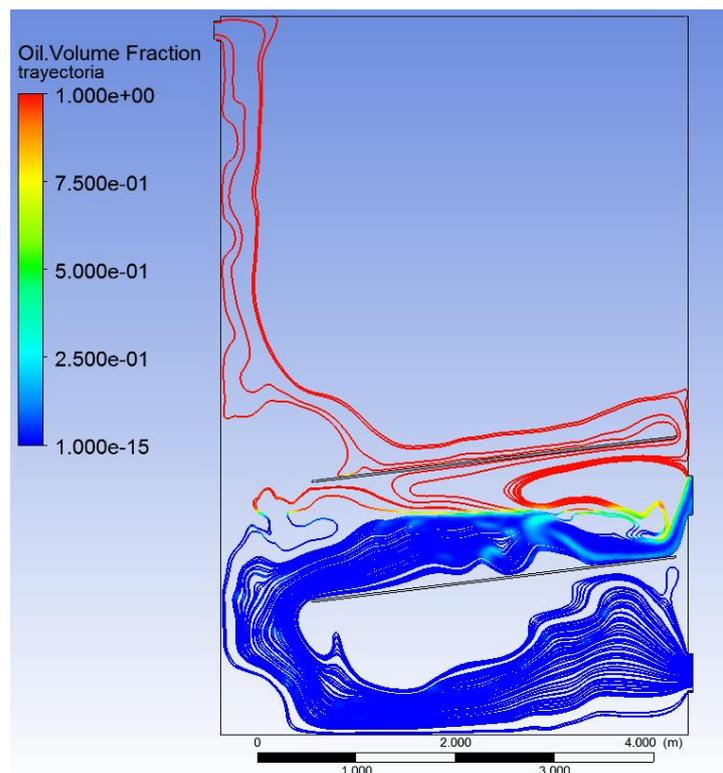


Figura 48. Trayectoria del flujo de partículas en el diseño 2D
(Fuente: Gil, 2020)

Anexo XII. Comportamiento de simulación 3D en la velocidad de entrada



Figura 49. Isovolumen de petróleo en simulación 3D
(Fuente: Gil, 2020)

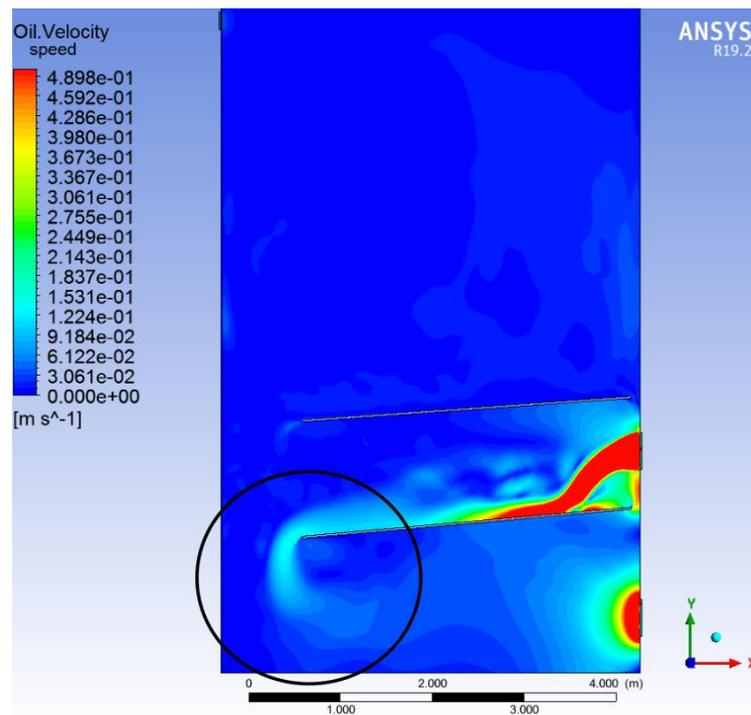


Figura 50. Contorno de velocidades en simulación 3D
(Fuente: Gil, 2020)

Anexo XIII. Trayectoria en simulaciones 3D

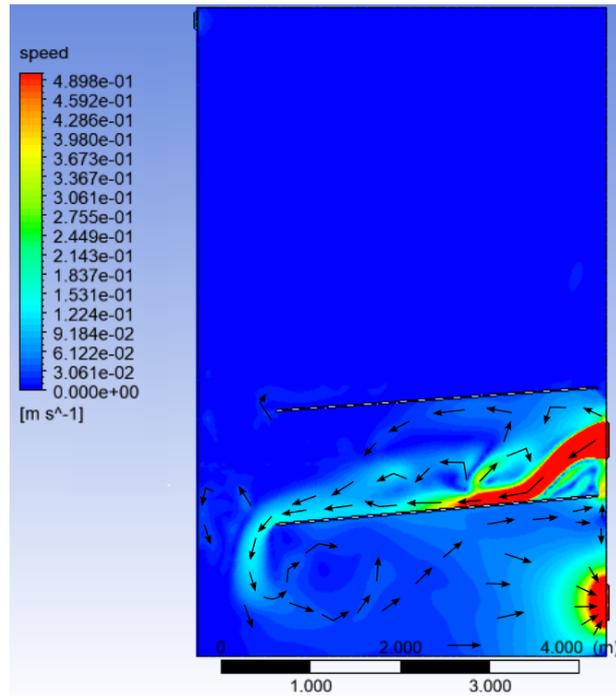


Figura 51. Contorno de velocidad de flujo en 3D + vectores
(Fuente: Gil, 2020)

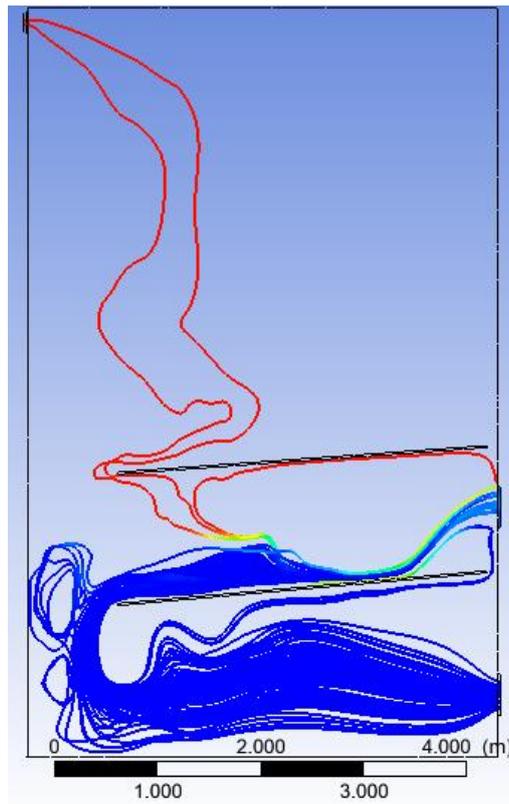


Figura 52. Trayectoria del flujo de partículas en el diseño 3D
(Fuente: Gil, 2020)

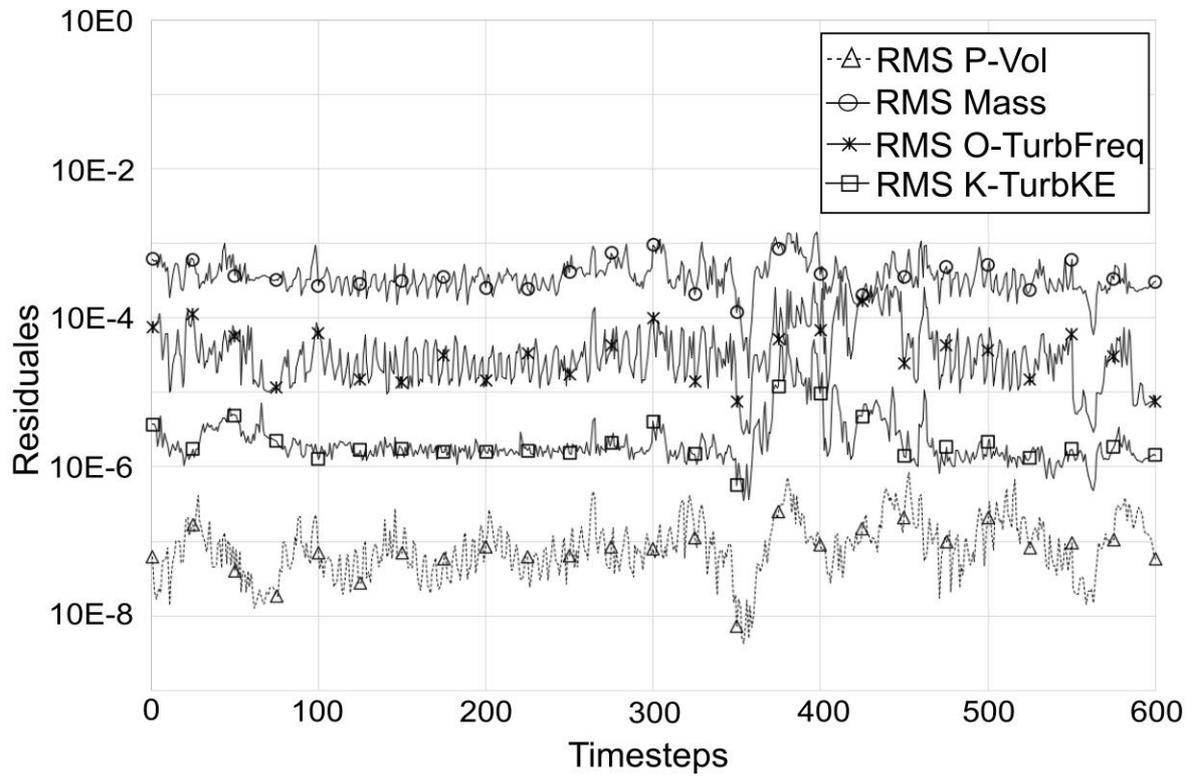
Anexo XIV. Magnitud de velocidad para independencia de malla

Tamaño de elemento	0.027	0.025	0.020	0.0175
Punto	Velocidad [m/s] en el segundo 60			
Checkouto	1,586E-02	2,853E-02	1,441E-02	1,498E-02
Checkup	2,205E-02	2,000E-02	2,185E-02	2,180E-02
Checkul	4,067E-02	2,064E-02	3,798E-02	3,464E-02
ref	1,058E-02	8,049E-03	1,162E-02	9,758E-03
Checkin	1,665E-01	1,820E-01	1,167E-01	1,035E-01
Checkll	3,321E-02	7,218E-02	4,741E-02	5,444E-02
Checkdown	6,598E-02	8,871E-02	5,723E-02	8,063E-02
Chckoutw	7,676E-02	7,602E-02	8,129E-02	7,640E-02

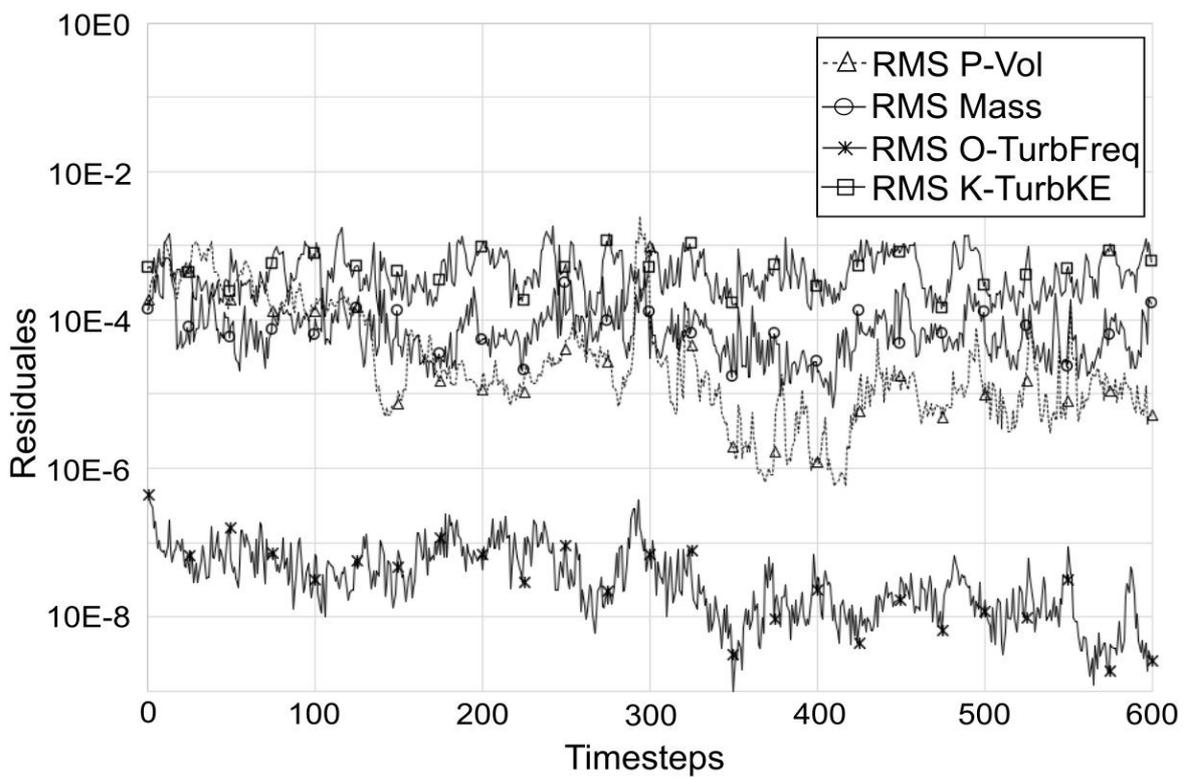
(Fuente: Gil, 2020)

Anexo XV. Variables residuales de simulaciones 2D

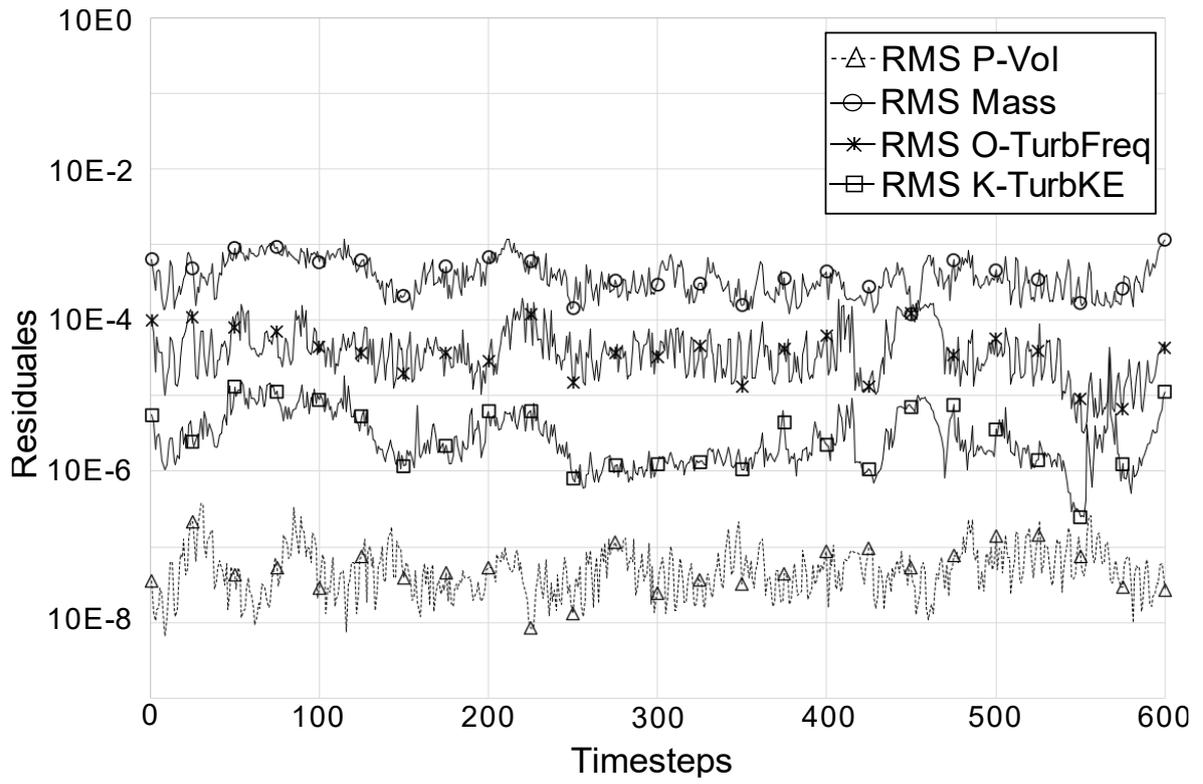
Malla 0.027



Malla 0.025



Malla 0.023



Anexo XVI. Cálculo de capacidad de simulaciones del diseño 2D

$$Q = A \cdot v = 0.19 \frac{m}{s} \cdot 0.008 m^2 = 0.00152 \frac{m^3}{seg}$$

Pero siendo 15 ranuras de entrada en el diseño:

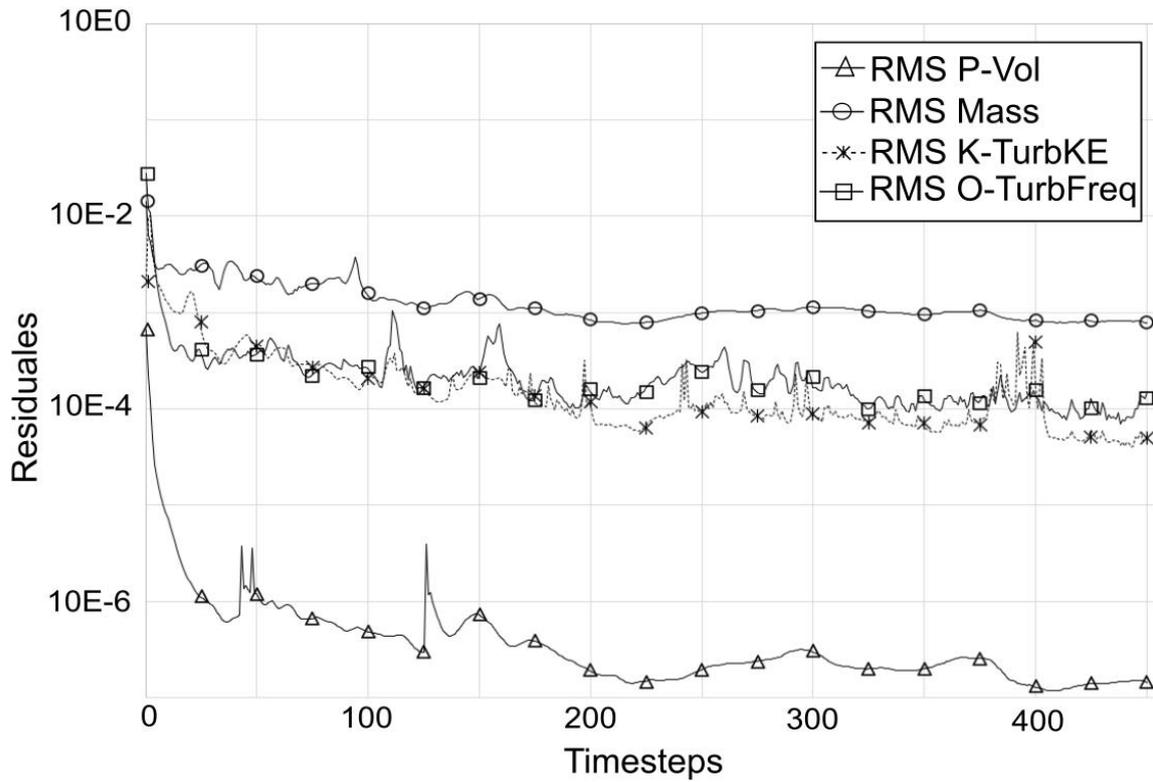
$$0.00152 \frac{m^3}{seg} \cdot 15 = 0.0228 \frac{m^3}{seg}$$

Entonces:

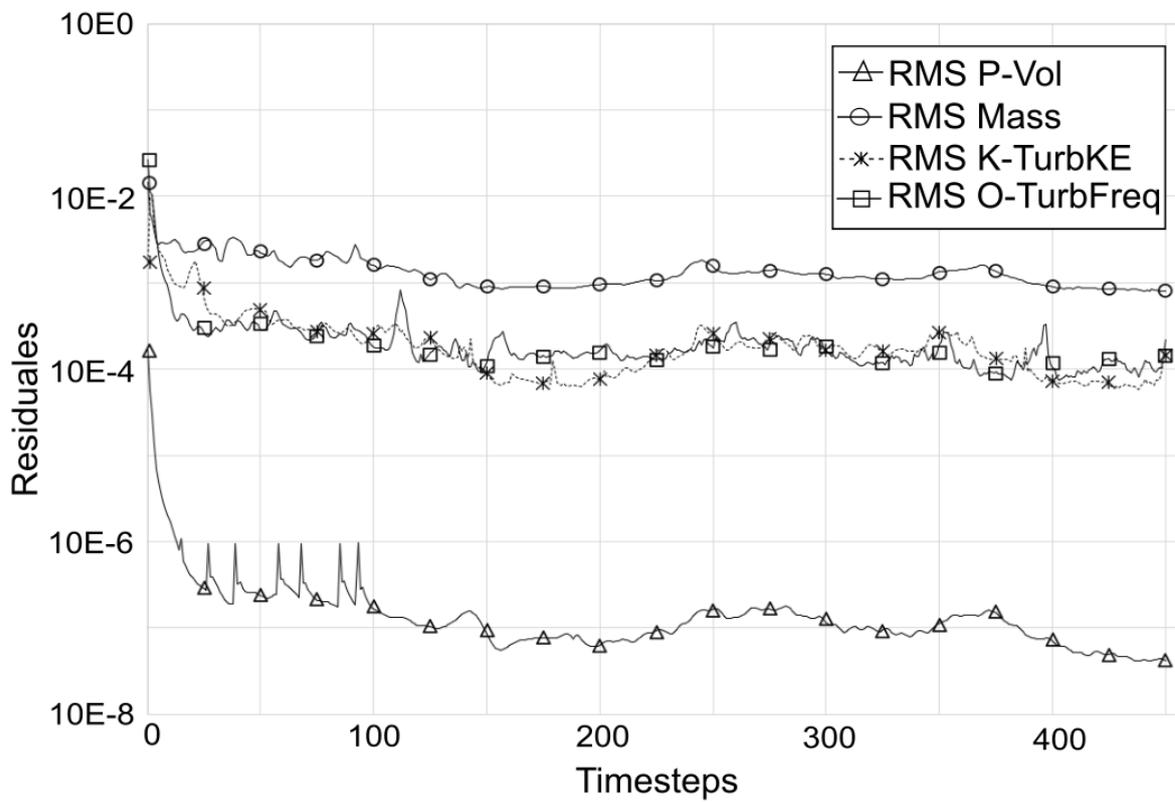
$$0.0228 \frac{m^3}{s} \times \frac{3600s}{1\cancel{hora}} \times \frac{24\cancel{horas}}{1día} = 1969.92 \approx 1970 \frac{m^3}{dia}$$

Anexo XVII. Variables residuales de simulaciones 3D

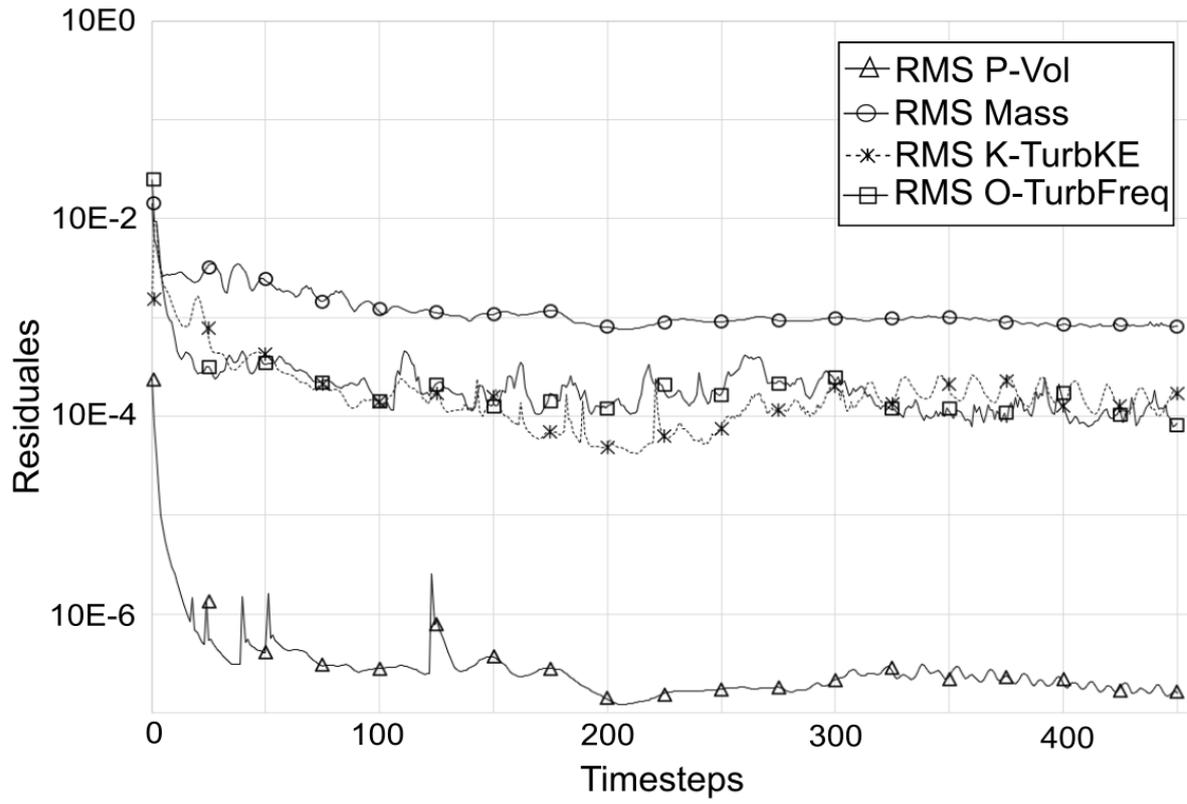
Malla 0.025



Malla 0.023



Malla 0.020



Anexo XVIII. Cálculo de capacidad de simulaciones del diseño 3D

$$Q = A \cdot v = 2 \frac{m}{s} \cdot 0.008m^2 = 0.016 \frac{m^3}{seg}$$

Al tener 15 ranuras:

$$0.016 \frac{m^3}{seg} \cdot 15 = 0.24 \frac{m^3}{seg}$$

Entonces:

$$0.24 \frac{m^3}{s} \times \frac{3600s}{1hora} \times \frac{24horas}{1día} = 20736 \frac{m^3}{día}$$