

Estudio de las Características de Flujo en un Separador Trifásico de una Facilidad  
Colombiana Utilizando Dinámica de Fluidos Computacional (CFD)

Jhon Edison León Vega

Monografía para optar al título de Especialista en Ingeniería del Gas

Director

Germán González Silva

Doctorado en Ingeniería Química

Co-Director

Natalia Prieto Jiménez

Doctorado en Ingeniería Química

Universidad Industrial de Santander  
Facultad de Ingenierías Físicoquímicas  
Escuela de Ingeniería de Petróleos  
Bucaramanga

2024

**Dedicatoria**

A nuestro señor Jesús, por su eterna misericordia, bondad y compañía

A mi mamita, por su amor incondicional

A mi papito, por su tenacidad constante

A la Familia León Vega, por ser inspiración de esfuerzo y trascendencia

A mis amigos Xrkngeles, por su amistad desde siempre

A Cerinza, por el privilegio de la vida en esta linda tierra Boyacense

### Agradecimientos

Mi mayor agradecimiento es y siempre será para Dios Padre, Hijo y Espíritu Santo, por el maravilloso don de la vida, sus infinitas bendiciones y amor incomparable. Infinitas gracias Señor Eterno por la oportunidad de volver a mi alma mater para seguir creciendo profesionalmente como Ingeniero Químico de Procesos.

Agradezco especialmente a mis queridos padres y hermanos, por todo el amor y apoyo incondicional.

A mí mismo por el esfuerzo y dedicación, pero sobre todo por perseverar fielmente en alcanzar cada sueño.

Al Prof. Dr. German Gonzales Silva por su confianza, orientación y acompañamiento en el desarrollo de este trabajo de aplicación en Ingeniería del Gas.

A la Dra. Natalia Prieto Jiménez por sus valiosos aportes alineados al éxito de este trabajo de posgrado.

Al Grupo de investigación de Modelamiento de Procesos de Hidrocarburos (GMPH) por la colaboración y soporte brindado para la realización de esta monografía de especialización.

*Seas quien seas, sea cual sea tu posición social, sea alta o baja; ten siempre mucha fuerza y determinación. Haz todo con mucho amor y con mucha fe en Dios porque un día llegarás a tu meta*

**Ayrton Senna**

*Eso que llamamos destino, está en una gran parte en manos de los hombres, cuando estos tienen ideas claras y propósitos firmes.*

**Enzo Ferrari**

## Tabla de Contenido

	Pág.
Introducción.....	14
1. Objetivos.....	17
1.1 Objetivo General.....	17
1.2 Objetivos Específicos .....	17
2. Marco de referencia .....	18
2.1 Antecedentes investigativos .....	18
2.2 Dinámica de fluidos computacional .....	21
2.3 Separadores multifásicos .....	21
2.3.1 Análisis CFD separadores horizontales.....	22
2.3.2 Análisis CFD separadores verticales .....	24
3. Metodología.....	25
3.1 Definición del problema .....	26
3.1.1 Propiedades de los fluidos .....	27
3.1.2 Construcción de la geometría en un modelo CAD .....	35
3.1.3 Balance de masa separador SE-001COL.....	39
3.2 Pre-Procesamiento .....	40
3.2.1 Dominio fluido del separador .....	40
3.2.2 Malla computacional tridimensional poliédrica .....	41
3.2.3 Configuración del modelo CFD del separador SE-001COL .....	46
3.3 Solución computacional .....	55

3.4 Pos-Procesamiento – Resultados ..... 59

4. Conclusiones..... 79

5. Recomendaciones ..... 85

Referencias bibliográficas ..... 89

### Lista de Figuras

	Pág.
Figura 1. Relación de la industria Oil&Gas con el uso de análisis CFD.....	18
Figura 2. Comportamiento de publicaciones científicas reportadas en la última década para estudios de flujo multifásico y separación de fases con CFD .....	19
Figura 3. Diagrama de flujo metodología en CFD .....	26
Figura 4. Curva de destilación simulada en Aspen Hysys con base en Assay del crudo .....	30
Figura 5. Variación densidad fases líquidas en función de la temperatura .....	31
Figura 6. Variación viscosidad en función de la temperatura. a) Crudo pesado. b) Agua .....	32
Figura 7. Variación propiedades de transporte del gas en función de la temperatura y presión. a) Curvas de densidad. b) Curvas de viscosidad .....	33
Figura 8. Variación tensión superficial de las fases en función de la temperatura.....	34
Figura 9. Vista lateral modelo CAD separador SE-001COL configuración de internos .....	36
Figura 10. Dimensiones generales separador primario horizontal SE-001COL .....	36
Figura 11. Modelo CAD 3D del separador trifásico SE-001COL, vista: a) Isométrica visualización estructura alámbrica. b) Superior. c) Inferior. d) Frontal. e) Posterior .....	37
Figura 12. Detalle de internos modelo CAD 3D del separador trifásico SE-001COL. a) Corte longitudinal vista trimétrica. b) Corte longitudinal vista lateral. c) Corte longitudinal detalle sección de entrada. d) Corte transversal detalle sección de salida .....	38
Figura 13. Esquema general de entrada y salidas de materia separador SE-001COL.....	39
Figura 14. Vista isométrica dominio fluido del separador SE-001COL .....	41
Figura 15. Malla superficial poliédrica, vistas: a) Lateral. b) Superior. c) Frontal .....	42

Figura 16. Malla tridimensional poliédrica detalles de refinamiento localizado, vista lateral corte longitudinal plano XY .....	43
Figura 17. Detalles refinamiento localizado, vistas: a) Superior corte longitudinal plano YZ altura media dispositivo de entrada. b) Superior corte longitudinal plano YZ altura media eliminador de niebla. c) Frontal corte transversal plano YZ sección media dispositivo de entrada. d) Superior corte longitudinal plano YZ altura media rompedores de vórtice .....	44
Figura 18. Rango métricas de oblicuidad y calidad ortogonal, recomendaciones de calidad de malla buenas prácticas en CFD .....	46
Figura 19. Especificaciones condiciones de contorno en el dominio fluido del separador .....	48
Figura 20. Simulaciones CFD baffle perforado. a) Sección simulada extracción dominio fluido simplificado. b) Contornos de presión flujo de crudo corte longitudinal plano XZ.....	49
Figura 21. Perfil de caída de presión sección baffle perforado del separador SE-001COL .....	50
Figura 22. Perfil de caída de presión del gas en el eliminador de niebla del separador .....	54
Figura 23. Ventana de monitoreo para el avance de la convergencia de los residuales .....	57
Figura 24. Ventana de monitoreo para el balance de masa en el proceso iterativo de resolución numérica para el separador trifásico SE-001COL .....	57
Figura 25. Ventana de monitoreo estabilidad física en el proceso iterativo de resolución numérica para el separador trifásico SE-001COL. a) Presión en contorno de entrada. b) Presión en contorno de salida agua. c) Presión en contorno de salida crudo .....	58
Figura 26. Comparación de la distribución de las fases dentro del separador trifásico SE-001COL. a) Condición inicial interfases. b) Condición final interfases en estado estacionario .....	60
Figura 27. Comparación fracción volumétrica de gas dentro del separador trifásico SE-001COL. a) Contornos. b) Representación de volumen solo gas.....	61

Figura 28. Comparación fracción volumétrica de crudo dentro del separador trifásico SE-001COL.  
a) Contornos. b) Representación de volumen solo crudo ..... 62

Figura 29. Comparación fracción volumétrica de agua dentro del separador trifásico SE-001COL.  
a) Contornos. b) Representación de volumen solo agua ..... 62

Figura 30. Líneas de corriente velocidad específica separador trifásico SE-001COL. Vistas:  
a) Lateral. b) Superior. c) Isométrica..... 63

Figura 31. Líneas de corriente velocidad específica en el separador trifásico SE-001COL. Vistas:  
a) Frontal. b) Posterior ..... 64

Figura 32. Patrón de flujo en el separador trifásico SE-001COL, líneas de corriente con fracción volumétrica de gas. Vistas: a) Lateral. b) Frontal. c) Posterior ..... 65

Figura 33. Isosuperficies de fracción volumétrica de gas para velocidades de flujo de 0,8 m/s en dispositivo de entrada tipo aletas. Vistas: a) Isométrica. b) Posterior ..... 66

Figura 34. Vista isométrica isosuperficies de fracción volumétrica para velocidades de flujo de 0,8 m/s en dispositivo de entrada tipo aletas ..... 66

Figura 35. Vista lateral patrón de flujo en el separador, vectores de velocidad con fracción volumétrica de las fases ..... 68

Figura 36. Vista isométrica contornos de velocidad específica en múltiples secciones transversales a lo largo del separador..... 69

Figura 37. Perfil de velocidad de los fluidos a lo largo del separador SE-001COL trazabilidad en los niveles centrales de las secciones ocupadas por las fases ..... 70

Figura 38. Vista isométrica contornos de velocidad específica en múltiples secciones transversales a lo largo del separador énfasis perfil de flujo desarrollado fase gas ..... 71

Figura 39. Perfil de velocidad desarrollado por el gas a lo largo del separador SE-001COL trazabilidad a diferentes alturas de la sección ocupada por el gas.....	71
Figura 40. Contornos de velocidad especifica en eliminador de niebla tipo malla de alambre. a) Vista posterior en plano YZ. b) Vista lateral en plano XY .....	72
Figura 41. Vista lateral contornos de presión en el separador SE-001COL en plano XY .....	73
Figura 42. Rastreo gotas de crudo. a) Diámetro de las gotas. b) Tiempo de residencia.....	75
Figura 43. Rastreo gotas de agua. a) Diámetro de las gotas. b) Tiempo de residencia .....	76
Figura 44. Rastreo partículas sólidas tendencia de asentamiento diámetros de arenas .....	76
Figura 45. Histogramas preliminares tiempos de residencia. a) Crudo. b) Agua.....	78

**Lista de Tablas**

	Pág.
Tabla 1. Condiciones de operación para simulación del separador SE-001COL.....	27
Tabla 2. Cromatografía del gas del separador SE-001COL campo colombiano.....	28
Tabla 3. Assay crudo que ingresa a separador primario SE-001COL campo colombiano .....	29
Tabla 4. Caracterización corriente de agua que ingresa al separador SE-001COL.....	29
Tabla 5. Propiedades fluidodinámicas para el gas, crudo pesado y agua .....	31
Tabla 6. Lista de conexiones boquillas principales de proceso .....	39
Tabla 7. Balance de materia para el separador SE-001COL .....	40
Tabla 8. Estadísticas calidad de malla poliédrica para las 3 regiones fluidas del equipo.....	45
Tabla 9. Configuración general modelo CFD separador trifásico SE-001COL.....	47
Tabla 10. Condiciones de frontera modelo CFD separador trifásico SE-001COL .....	47
Tabla 11. Caracterización pérdida de carga a través del baffle perforado del separador .....	50
Tabla 12. Parámetros porous jump para modelamiento simplificado del baffle perforado.....	52
Tabla 13. Caracterización pérdida de carga del gas a través del eliminador de niebla .....	53
Tabla 14. Coeficientes modelo medio poroso para simplificación eliminador de niebla.....	55
Tabla 15. Parámetros análisis preliminar DPM para rastreo de fases discretas .....	74
Tabla 16. Resultados preliminares estadísticas rastreo de gotas tiempos de residencia.....	77

## Resumen

**Título:** Estudio de las Características de Flujo en un Separador Trifásico de una Facilidad Colombiana Utilizando Dinámica de Fluidos Computacional (CFD)\*

**Autor:** Jhon Edison León Vega\*\*

**Palabras Clave:** Separador trifásico, Flujo multifásico, Dinámica de fluidos computacional, Simulación CFD 3D, Perfiles de flujo, Modelos de medio poroso.

### Descripción:

El comportamiento de flujo multifásico en un separador primario horizontal fue estudiado empleando análisis en dinámica de fluidos computacional (CFD) para determinar oportunidades potenciales de mejora que promuevan la eficiencia de separación de gas, crudo pesado y agua. El separador trifásico analizado es una facilidad de superficie de un campo colombiano. Un modelo numérico tridimensional a escala completa fue desarrollado abordando un enfoque de modelamiento Euleriano-Lagrangiana (VOF-DPM). Simplificaciones utilizando modelos de medio poroso fueron realizadas para representar conservativamente el flujo de fases a través del bafle perforado y eliminador de niebla; los coeficientes de resistencia inercial y viscosa se estimaron ajustando los perfiles de caída de presión a ecuaciones de tipo Hazen-Dupuit-Darcy. Los resultados de simulación CFD revelan como etapa de diagnóstico que el separador presenta problemas de desempeño asociadas principalmente con el dispositivo de entrada tipo aletas en la separación primaria gas/líquido, lo cual afecta la calidad de la distribución de flujo derivando en canalización del gas por encima de la interfase gas/crudo. Lo anterior genera zonas muertas o subutilizadas en el primer tercio longitudinal del separador (alrededor de 13,12 ft). Asimismo, se identifica que en el eliminador de niebla no se establece un perfil de velocidad de gas uniforme, debido a la instalación de la almohadilla respecto a la boquilla de salida por debajo del espaciamiento mínimo requerido. Las estadísticas del análisis de fase discreta (DPM) para el rastreo de gotas de crudo y agua usando el método de distribución de tamaño de partícula de Rosin-Rammler, predicen tiempos de residencia efectivos promedio de 6,3 minutos para el crudo y 9,3 minutos para el agua, equivalente a porcentajes de utilización del separador de 63,3% y 93,3%, respectivamente. Lo que indica la existencia de márgenes para incrementar el tiempo de residencia y promover los fenómenos de coalescencia de gotas dispersas.

---

\* Monografía para optar al título de Especialista en Ingeniería del Gas

\*\* Facultad de Ingenierías Físico-Químicas. Escuela de Ingeniería de Petróleos. Director: Germán González Silva, Doctorado en Ingeniería Química. Co-Director: Natalia Prieto Jiménez, Doctorado en Ingeniería Química.

### Abstract

**Title:** Study Of Flow Characteristics in a Colombian Three-Phase Separator Facility Using Computational Fluid Dynamics (CFD)\*

**Author:** Jhon Edison León Vega\*\*

**Keywords:** Three-phase separator, Multiphase flow, Computational Fluid Dynamics, 3D CFD simulation, Flow profiles, Porous media models.

### Description:

The behavior of multiphase flow in a horizontal primary separator was studied using computational fluid dynamics (CFD) analysis to determine potential improvement opportunities that enhance the efficiency of gas, heavy crude, and water separation. The analyzed three-phase separator is a surface facility of a Colombian field. A full-scale three-dimensional numerical model was developed using an Eulerian-Lagrangian modeling approach (VOF-DPM). Simplifications using porous media models were made to conservatively represent the flow of phases through the perforated baffle and mist eliminator; the coefficients of inertial and viscous resistance were estimated by fitting the pressure drop profiles to Hazen-Dupuit-Darcy type equations. The CFD simulation results revealed during the diagnostic stage that the separator presents performance issues mainly associated with the inlet device type multi vane in the gas/liquid primary separation, which affects the quality of the flow distribution leading to gas channeling above the gas/oil interface. This results in dead zones or underutilized areas in the first longitudinal third of the separator (around 13.12 ft). Likewise, it is identified that in the mist eliminator, a uniform gas velocity profile is not established, due to the installation of the pad with respect to the gas outlet nozzle below the minimum required spacing. Discrete phase analysis (DPM) statistics for tracking crude and water droplets using the Rosin-Rammler particle size distribution method predict average effective residence times of 6.3 minutes for crude and 9.3 minutes for water, equivalent to separator utilization percentages of 63.3% and 93.3%, respectively. This indicates the existence of margins to increase residence time and promote the coalescence of dispersed droplets.

---

\* Monograph

\*\* Facultad de Ingenierías Físico-Químicas. Escuela de Ingeniería de Petróleos. Director: Germán González Silva, Doctorado en Ingeniería Química. Co-Director: Natalia Prieto Jiménez, Doctorado en Ingeniería Química.

## Introducción

La eficiencia en los procesos de separación de flujo multifásico constituye un factor clave en las operaciones de producción de crudo y gas en facilidades de superficie y costa afuera, donde desviaciones en el desempeño de las etapas primarias, generan un impacto directo en los equipos aguas abajo en las diferentes líneas o trenes de tratamiento para deshidratación de crudo (*oil dehydration*), desaceitado de aguas de producción (*produced water deoling*) y tratamiento de gas (*gas sweetening and gas dehydration*), por ejemplo, las bombas requieren de líquido libre de gas para evitar cavitación, mientras que los compresores y equipos de deshidratación requieren gas libre de líquido (Arnold & Stewart, 2008). Según Laleh et al., (2012) “los separadores multifásicos y su rendimiento son un problema clave para el procesamiento económico y estable de fluidos de hidrocarburos”, por lo tanto, asegurar el performance de los separadores primarios es un lineamiento estratégico para el desarrollo de operaciones técnicas más sostenibles, donde las necesidades y requerimientos de cada campo colombiano, deben ser abordados de manera puntual para la resolución de problemas asociados a la separación eficiente de las diferentes fases presentes en las corrientes provenientes de los yacimientos de hidrocarburos.

Cabe destacar, el diagnóstico de equipos existentes en servicio es una tarea limitada bajo métodos convencionales, donde los resultados no brindan información detallada para mejorar el entendimiento de los fenómenos físicos involucrados en condiciones específicas de operación, no permiten visualizar rigurosamente punto a punto el comportamiento interno de los perfiles de flujo

de los fluidos, lo cual dificulta la identificación de las fuentes locales (configuración de internos) que pueden reducir o afectar significativamente el rendimiento de los procesos de separación de las fases. Lo anterior se traduce en que la *data* obtenida difícilmente puede generar hallazgos relevantes que soporten sólidamente iniciativas o proyectos claros de intervención temporal de los equipos para la solución de problemas (*troubleshooting*) y optimización del rendimiento en campo.

En esta monografía se presenta el desarrollo de una simulación numérica tridimensional (3D) para predecir el comportamiento de los fluidos a través de un separador trifásico con análisis en dinámica de fluidos computacional (CFD, por sus siglas en inglés); se abordó un enfoque de modelado multifásico Euleriano-Lagrangiano para estudiar las características de flujo y distribución de fases (gas, crudo y agua) considerando las dimensiones y configuración actual de internos. Este trabajo propone la etapa de diagnóstico del separador primario SE-001COL (actualmente en servicio en una facilidad colombiana de producción en superficie), el cual requiere identificar oportunidades potenciales de mejora para promover el performance de separación de las fases.

El desarrollo e intensificación de equipos y procesos industriales más eficientes es una tendencia mundial orientada a mejorar las operaciones productivas en todo el espectro de sectores económicos, lo cual está correlacionado con las directrices urgentes de mitigar el impacto ambiental y avanzar bajo un enfoque sostenible en las rutas establecidas para encaminar la descarbonización de la economía. La industria de los hidrocarburos es un actor activo y determinante, que desde hace décadas ha liderado y abanderado todo tipo de iniciativas que

optimizan los procesos de explotación de hidrocarburos en toda la cadena de valor, desde la exploración y producción (*upstream*), transporte y almacenamiento (*midstream*) y, refinación y distribución de productos (*downstream*).

De acuerdo con los lineamientos y metas trazadas en el marco de la transición energética, la producción de gas natural es estratégica, pues se constituye como un recurso de bajas emisiones que contribuirá a suplir parte de la creciente demanda energética. En ese sentido, es imperativo mejorar las capacidades de separación de gas, crudo, agua y sólidos en los equipos primarios de producción tanto en facilidades de superficie como costa afuera, con el propósito de establecer operaciones de tratamiento más eficientes, al evitar condiciones de operación fuera de especificación para las unidades aguas abajo, lo cual impactaría positivamente el balance financiero de los campos al garantizar una mayor recuperación de los fluidos de interés (hidrocarburos).

## 1. Objetivos

### 1.1 Objetivo General

Estudiar las características de flujo multifásico del separador en operación SE-001COL de una facilidad colombiana utilizando CFD para determinar oportunidades potenciales de mejora que promuevan la separación de gas, crudo y agua.

### 1.2 Objetivos Específicos

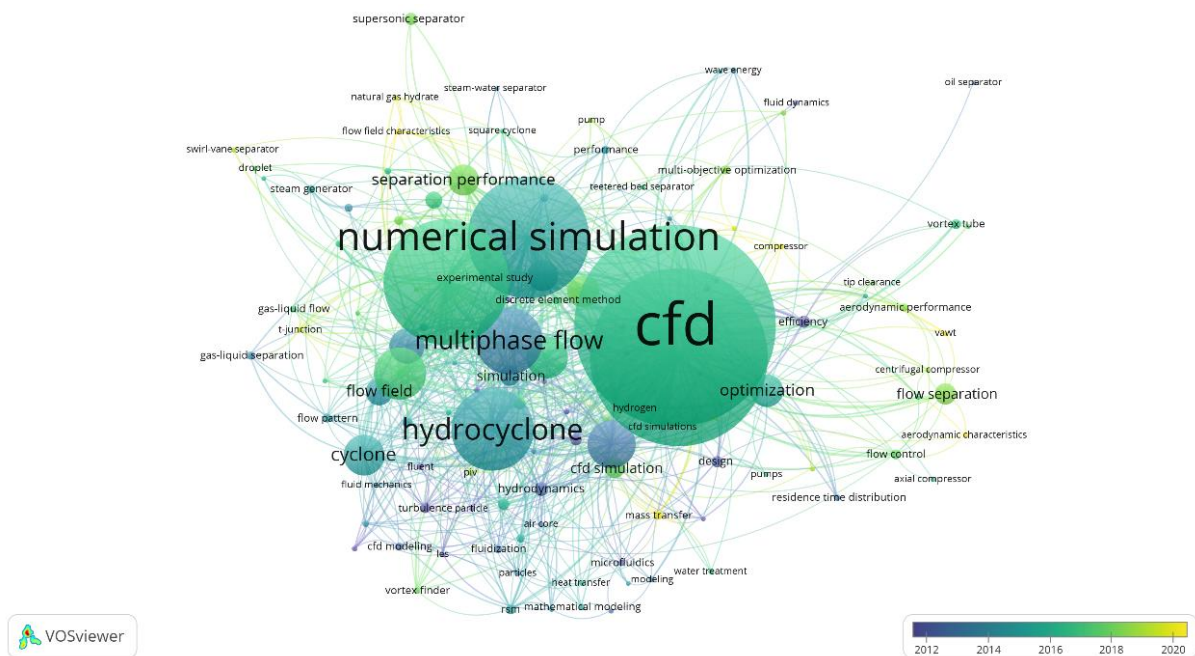
- Construir el modelo CAD tridimensional del separador trifásico SE-001COL considerando los aspectos geométricos relevantes para fines de análisis CFD.
- Crear una malla computacional poliédrica del separador empleando herramientas avanzadas de discretización del dominio fluido.
- Realizar el *Setup* para la simulación CFD del separador configurando todos los aspectos numéricos característicos del enfoque de modelamiento abordado Euleriano-Euleriano para aproximar conservativamente los fenómenos de flujo multifásico de interés.
- Analizar los resultados que representan apropiadamente el comportamiento del flujo interno y distribución de las fases a través del sistema de estudio empleando herramientas de post-procesamiento CFD, revisar el desempeño de la configuración actual de internos a las condiciones de operación y con las propiedades de los fluidos determinadas con base en los reportes de laboratorio suministrados por el campo.



En contraste, la Figura 2 bosqueja el panorama acotado de las tendencias científicas de la última década en investigaciones numéricas para la resolución de problemas asociados con flujo y separación de múltiples fases.

### Figura 2

*Comportamiento de publicaciones científicas reportadas en la última década para estudios de flujo multifásico y separación de fases con CFD*



*Nota.* Mapa mental creado con VOSviewer-Scopus

De acuerdo con la revisión presentada por (Raynal et al., 2015), desde los años 90 la industria de los hidrocarburos cada vez recurre más a estudios en CFD para diferentes propósitos, donde de forma particular muestran las contribuciones de simulaciones numéricas en el desarrollo de procesos enfocados en tecnologías de refinación, en los cuales se abordan distintas aplicaciones con configuraciones de flujo: monofásico, bifásico (gas-liquido o gas-sólido) y trifásico (gas-liquido-sólido).

Adicionalmente, Raynal et al., (2015), resaltan el papel importante del CFD en etapas de diagnóstico, *troubleshooting* y diseño óptimo de equipos, pues afirman que en muchos casos en el desarrollo de procesos se asume una distribución de flujo perfecta y los diseños son construidos bajo ese enfoque, lo cual por la retroalimentación del campo las operaciones de las plantas requieren de soporte técnico para entender fenómenos no esperados (puntos calientes detectados con termocuplas en reactores de lecho fijo, altas caídas de presión local, malos rendimientos de separación, entre otros), problemas operacionales que deben ser resueltos tan rápido como sea posible para aproximar la operación lo más cercano a lo esperado, lo cual puede ser manejado con estudios en CFD debido a tiempos cortos para la obtención de resultados.

Por otra parte, Laleh et al., (2012), presentan una revisión de la literatura relevante en el diseño y simulación de separadores multifásicos, donde describen los beneficios que el análisis CFD puede generar en la optimización del diseño de nuevos separadores y en la solución de problemas con diseños existentes; un aspecto sobresaliente mostrado en el marco de este trabajo, es la descripción de las grandes contribuciones de estudios basados en CFD en el rendimiento de separación de separadores industriales llevadas a cabo por dos de las compañías más grandes en la construcción de estos equipos, NATCO Group y SINTEF Group, así como, las investigaciones de dos tesis académicas con estudios experimentales en el desempeño de separadores en facilidades de producción de crudo y, una tesis que presenta un enfoque eficiente para la simulación realista de separadores multifásicos con una mejora a los criterios de diseño.

## 2.2 Dinámica de fluidos computacional

La fluidodinámica computacional o dinámica de fluidos computacional (CFD) es un área del conocimiento el cual predice el flujo de fluidos, transferencia de calor y masa, reacciones químicas y otros fenómenos relacionados, a partir de la resolución por métodos numéricos de los sistemas de ecuaciones que rigen o modelan matemáticamente el flujo de fluidos; esta técnica permite solucionar problemas multidimensionales de flujo de fluidos en varios campos de la ingeniería, y su origen está basado a partir de la combinación de las disciplinas de mecánica de fluidos y cálculo numérico (Prieto Jiménez, 2019).

## 2.3 Separadores multifásicos

Como lo describe Arnold & Stewart, (2008) “los fluidos de producción en cabeza de pozo son mezclas complejas de hidrocarburos, cuyas corrientes están compuestas por fases líquidas y gas, debido a que las corrientes de un pozo que fluyen desde un reservorio de petróleo caliente y alta presión, experimenta reducción en la presión y temperatura hacia la superficie; la velocidad del gas arrastra o transporta gotas de líquido mientras que los líquidos transportan burbujas de gas, por lo tanto, la separación física de estas fases es una operación unitaria básica en la producción, procesamiento y tratamiento de petróleo y gas, la cual se lleva a cabo en equipos conocidos como separadores multifásicos clasificados como: bifásicos (dos fases) sí separan gas desde una corriente total de líquido y trifásicos (tres fases) sí también separan la corriente líquida en sus componentes de crudo y agua”.

### 2.3.1 Análisis CFD separadores horizontales

Kharoua et al., (2013) investigaron el rendimiento y comportamiento de flujo multifásico interno de un separador trifásico de una facilidad de superficie existente a través de simulación en CFD, donde utilizaron el modelo multifásico Euleriano-Euleriano del código comercial Ansys Fluent y un enfoque de modelamiento más robusto para tener en cuenta los fenómenos de coalescencia y ruptura de gota a través del modelo PBM (*Population Balance Model*). Por otra parte, Ghaffarkhah et al., (2017), estudiaron los fenómenos de separación de tres fases a partir de un separador horizontal trifásico, dimensionado con dos procedimientos semiempíricos; donde, los perfiles de flujo de las fases, el rendimiento de separación y el comportamiento de partículas secundarias fueron analizados para mejorar la comprensión del enfoque de diseño.

El trabajo presentado por Al-Khalifa et al., (2017), muestra la aplicación de modelos tridimensionales (3D) en CFD para simular las fuerzas de flujo reales que actúan sobre tres diferentes dispositivos de entrada (*inlet diverter*) en un separador horizontal, con el fin de evaluar la integridad estructural del diseño mecánico, bajo condiciones de alimentación en régimen de flujo tapón (*slug flow*). Para ello, desarrollaron una serie de análisis de interacción fluido-estructura FSI (*Fluid Structure Interaction*) para determinar la reacción mecánica de la estructura del dispositivo de entrada, donde los perfiles de las fuerzas hidrodinámicas calculadas por el modelo CFD, son mapeadas como presión de carga distribuida en un análisis estructural FEA (*Finite Element Analysis*); cabe destacar, que este trabajo desarrolla una metodología para el diseño de nuevos internos en separadores de dos y tres fases, así como, para *slug catchers* en plantas de separación de gas y crudo.

Con base en los resultados y configuración experimental de un separador horizontal gravitacional, Acharya & Casimiro, (2020), evaluaron las características de flujo a través de simulación CFD utilizando la misma geometría y bajo condiciones similares, donde los resultados numéricos concuerdan cualitativamente con los resultados experimentales. Por otro lado, Krzemianowski et al., (2020), simularon en CFD el flujo y rendimiento de un separador trifásico (gas/ crudo y agua) el cual hace parte de una facilidad operada por una compañía de perforación donde consideraron el modelo multifásico Euleriano-Euleriano y la representación de los coalescedores y baffles por medio de zonas especiales de flujo con el modelo de medio poroso, concluyen que la adición de simplificaciones reduce el tiempo computacional de cálculo, con relación a modelos geométricos más robustos, aproximando el comportamiento de la operación de separadores; lo cual es aceptable para la industria, ya que puede determinar parámetros básicos relacionados con el proceso de separación (Prieto Jiménez, 2019).

Otro aspecto de interés en el estudio de flujo multifásico para la separación de los fluidos de producción de yacimientos de petróleo y gas es el comportamiento de las partículas de arena, la acumulación de sólidos en los separadores requiere de rutinas de barrido y drenado del material asentado por medio de operaciones en línea con sistemas *sand jet and drain*. En ese sentido, se resalta el trabajo de Basyouny, (2022), en el cual se analizó la separación de arena en un desarenador (*desander*) horizontal de flujo trifásico abordando un estudio en CFD y pruebas experimentales empleando aire, agua y arena para comparar los resultados numéricos. Los resultados experimentales y de simulación mostraron que el 99% de la arena es asentada en el 54% de la longitud del desarenador, demostrando la utilidad del modelo CFD para predecir la región esperada donde las partículas de arena tienden asentarse dentro del equipo y consolidando

una herramienta útil para análisis futuros cuando las propiedades de los fluidos varíen con el cambio de las condiciones de operación.

### **2.3.2 Análisis CFD separadores verticales**

En contra parte, también se han realizado aplicaciones de CFD para analizar el comportamiento de los fluidos en separadores verticales o ciclones, tal es el caso del estudio realizado por Cornejo Caceres et al., (2019); Zhu, (2017), donde se analizó el efecto de un separador de flujo multifásico tipo ciclón en la separación de agua y arenas del gas natural utilizando los modelos VOF y DPM (*Discrete Phase Model*), este último para ejecutar análisis de fase discreta y rastrear el comportamiento de las fases secundarias a partir del cual se evidenció que en la salida de gas no se presentaba arrastre de gotas de agua y partículas de arenas.

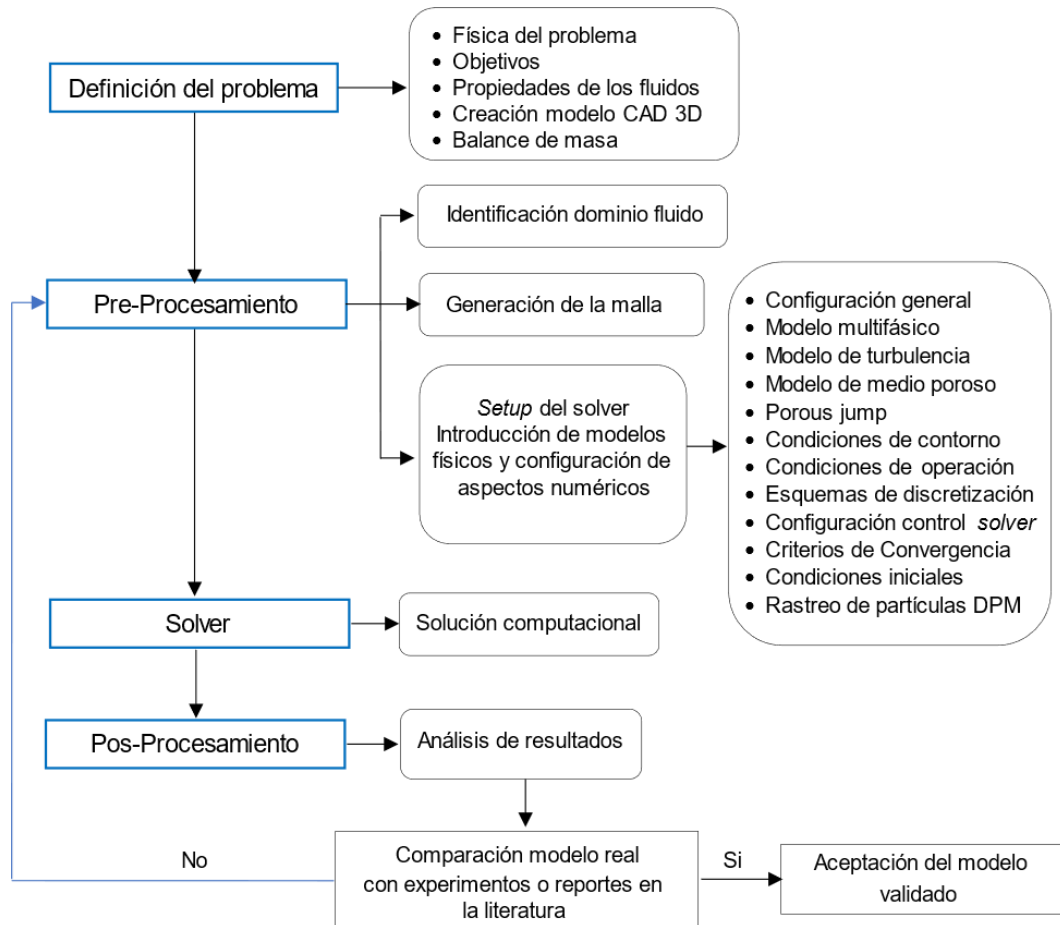
Tomescu & Bucur, (2021), presentaron una investigación numérica del proceso de separación de aceite de una corriente de aire en un separador vertical de una instalación de compresores de tornillo, para lo cual desarrollaron un modelo CFD 3D conservativo donde el dominio fluido computacional fue dividido en cinco subdominios; desde este enfoque, tres regiones fueron especificadas como zonas de flujo libre y las otras dos definidas como zonas de flujo especial a través del modelo de medio poroso para representar los eliminadores de niebla (*demister*). Los resultados del modelamiento CFD en términos de fracciones volumétricas de las fases y los perfiles de líneas de corriente concuerdan con resultados similares publicados en la literatura, por lo cual, los autores concluyen que el abordamiento del modelo numérico aproxima el rendimiento del separador bifásico equipado con dos eliminadores de niebla. Por otro lado, Ma

et al., (2022), usaron simulación CFD para diseñar un dispositivo más eficiente para campos de crudo con recobro mejorado con inyección de CO<sub>2</sub>, el cual consiste en un equipo integrado que combina un separador horizontal con un ciclón cilíndrico gas-líquido (GLCC). El análisis de los resultados de las características del flujo del prototipo inicial muestra que las eficiencias de separación gas-líquido dependen directamente de la fracción de entrada de líquido en el fluido de producción, donde valores superiores desde el 70% incrementa el arrastre de líquido en la corriente de salida de gas y valores inferiores desde el 30% aumentan el contenido de gas en la corriente de salida de líquido.

### 3. Metodología

Para el estudio de las características de flujo de las fases a través del separador primario SE-001COL, actualmente en operación en una facilidad colombiana en superficie se implementó análisis CFD; esta técnica es ampliamente usada como una herramienta robusta en el campo de la ingeniería asistida por computadora (CAE) para solucionar problemas multidimensionales de flujo de fluidos, que pueden implicar transferencia de calor y masa, entre otros fenómenos de interés.

Las técnicas CFD están basadas en la mecánica de fluidos y teoría de los fenómenos de transporte, usa el método numérico de volúmenes finitos para discretizar ecuaciones diferenciales parciales (ecuaciones de conservación o transporte) en un sistema de ecuaciones algebraicas, las cuales son solucionadas. Cabe destacar que, toda simulación en CFD tiene una estructura básica de cuatro etapas fundamentales, donde la metodología empleada para el abordamiento del modelamiento de flujo multifásico en el separador es resumida en la Figura 3.

**Figura 3***Diagrama de flujo metodología en CFD*

*Nota.* Adaptado de González S, (2012)

### 3.1 Definición del problema

Este trabajo tiene como finalidad presentar el diagnóstico del separador trifásico SE-001COL, predecir el comportamiento interno de los patrones de flujo de las fases considerando las condiciones de operación actuales, así como, las propiedades de los fluidos estimadas a partir de la información de caracterización reportada por laboratorio para el gas, crudo y agua, lo que permitirá validar el rendimiento de separación de las fases e identificar posibles márgenes de

mejora que puedan promover los fenómenos de separación multifásica. Las condiciones de operación del separador SE-001COL específicas por el campo para el desarrollo de las simulaciones numéricas CFD se listan en la Tabla 1.

**Tabla 1**

*Condiciones de operación para simulación del separador SE-001COL*

<b>Condiciones de operación</b>	
Flujo volumétrico total [BFPD]	25.000
Flujo volumétrico agua [BWPD]	17.500
Flujo volumétrico crudo [BOPD]	7.500
Flujo volumétrico gas [SCFD]	3.000.000
% BSW	70,00
GOR [SCF/bbl aceite]	400
Temperatura [°F]	160
Presión [psig]	60

### 3.1.1 Propiedades de los fluidos

El modelamiento de los fluidos para cualquier sistema de estudio es una etapa determinante para la precisión de los resultados, ya que, a medida que más propiedades sean conocidas la caracterización de los fluidos será mejor y, por lo tanto, mayor la aproximación del comportamiento real de los fenómenos físicos relacionados. En ese orden de ideas, las propiedades de transporte de los fluidos es una información de entrada relevante para los modelos CFD, por ello, para determinar las propiedades del gas, crudo y agua asociados al separador primario de producción SE-001COL, se empleó la información consignada en los resultados de la analítica suministrada por el campo. En la Tabla 2 se presenta la cromatografía del gas reportada por los análisis de laboratorio.

**Tabla 2***Cromatografía del gas del separador SE-001COL campo colombiano*

<b>Composición Gas</b>		
<b>Componentes</b>		<b>% Molar</b>
Nitrógeno	N <sub>2</sub>	0,995
Dióxido de carbono	CO <sub>2</sub>	4,757
Oxígeno	O <sub>2</sub>	0,88
Ácido Sulfhídrico	H <sub>2</sub> S	0
Metano	C <sub>1</sub>	87,854
Etano	C <sub>2</sub>	3,079
Propano	C <sub>3</sub>	0,716
Iso-Butano	iC <sub>4</sub>	0,28
n-Butano	nC <sub>4</sub>	0,418
Iso-Pentano	iC <sub>5</sub>	0,282
n-Pentano	nC <sub>5</sub>	0,141
Hexanos	C <sub>6</sub>	0,19
Heptanos	C <sub>7</sub>	0,208
Octanos	C <sub>8</sub>	0,145
Nonanos	C <sub>9</sub>	0,027
Decanos	C <sub>10</sub>	0,028
	<b>Total</b>	<b>100</b>

<b>Parámetro</b>	<b>Unidad</b>	<b>Valor</b>
Gravedad específica	Air = 1 @ 14,65 psia, 60°F	0,6689
Masa molecular	g/mol	19,31
Densidad gas ideal	kg/m <sup>3</sup> @ 14,65 psia, 60°F	0,8153
Valor calorífico ideal bruto	BTU/ft <sup>3</sup> @ 14,65 psia, 60°F	1035
Valor calorífico ideal neto	BTU/ft <sup>3</sup> @ 14,65 psia, 60°F	933
Temperatura pseudo crítica	R	369
Presión pseudo crítica	psia	679
Factor compresibilidad del gas	14,65 psia, 60°F	0,9969

En la Tabla 3 y la Tabla 4 se muestra los reportes de laboratorio de la caracterización de los líquidos que ingresan al separador trifásico, donde para la fase ligera se presenta el *Assay* del crudo y para la fase pesada las características del agua, respectivamente.

**Tabla 3***Assay crudo que ingresa a separador primario SE-001COL campo colombiano*

<b>Características del crudo</b>		
<b>Parámetro</b>	<b>Unidad</b>	<b>Valor</b>
Gravedad API @ 60°F	°API	16,24
Punto de fluidez	°C	-18
Punto de inflamabilidad	°C	24
Contenido de sal	PTB	85,3
Azufre total	% w/w	1,26
Contenido de Asfáltenos	% w/w	1,5
Contenido de Parafinas	% w/w	6,5
Viscosidad @ 100 °F	cP	406,3
Viscosidad @ 122 °F	cP	182,4
Viscosidad @ 200 °F	cP	21,2

<b>Destilación</b>		<b>ASTM D-86</b>
<b>% Volumen líquido</b>	<b>Temperatura [°F]</b>	
0	IBP – 240	
5%	446	
10%	540	
20%	576	
30%	582	

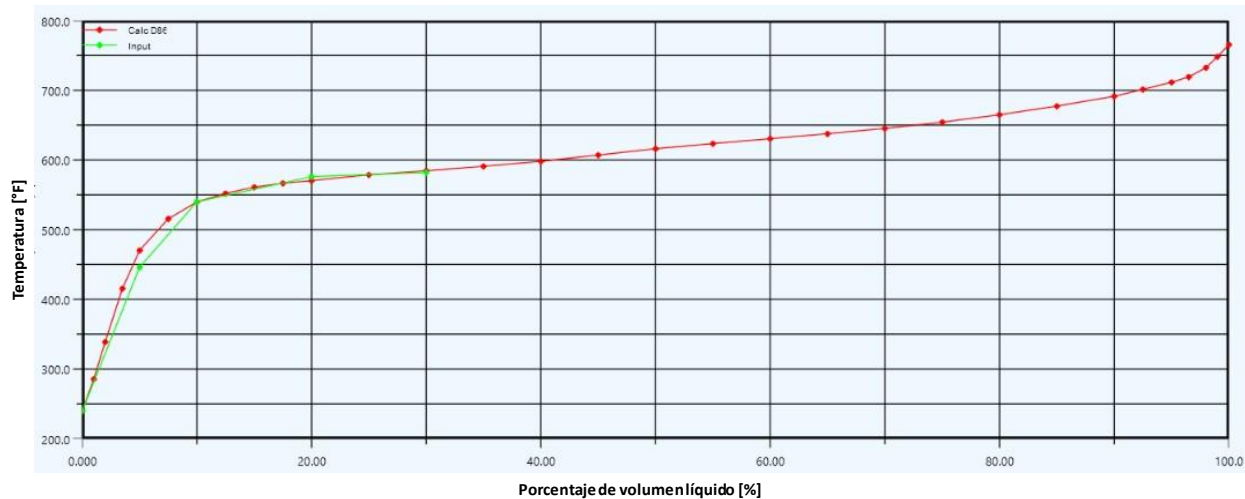
**Tabla 4***Caracterización corriente de agua que ingresa al separador SE-001COL*

<b>Características del agua</b>		
<b>Parámetro</b>	<b>Unidad</b>	<b>Valor</b>
pH @ 77°F	-	7,0
Temperatura	°C	33,4
Dióxido de carbono sol.	mg CO <sub>2</sub> /L	980
Ácido sulfhídrico sol.	mg H <sub>2</sub> S/L	< 1,5
Dureza total	mg CaCO <sub>3</sub> /L	2180
Calcio	mg Ca/L	1740
Magnesio	mg Mg/L	106,94
Hierro total	mg Fe/L	0,37
Cloruros	mg /L	16.840
Sulfatos	mg SO <sub>4</sub> /L	295
Bicarbonatos	mg HCO <sub>3</sub> /L	805,2

En la Figura 4 se puede observar la predicción de la curva de destilación a partir de la información del Assay utilizando el simulador de procesos *Aspen Hysys*. Un aspecto para destacar es que la curva de destilación se ajusta de manera adecuada a la información de entrada, por tal motivo, este simulador fue empleado como herramienta base para calcular las propiedades fluidodinámicas del crudo pesado (16,24 °API), así como, las propiedades del gas y agua a las condiciones de operación en que son realizadas las simulaciones numéricas.

#### Figura 4

*Curva de destilación simulada en Aspen Hysys con base en Assay del crudo*



Las propiedades de transporte para el gas, crudo y agua a las condiciones de operación del separador SE-001COL se resumen en la Tabla 5, donde es pertinente aclarar que para propósitos de simulación CFD la transferencia de calor fue despreciada considerando que la temperatura en el separador permanece casi constante, motivo por el cual, las propiedades de los fluidos fueron estimadas a 160 °F. Por lo anterior, cabe comentar que la fase crudo y agua fueron consideradas como fluidos Newtonianos. Así mismo, también es importante tener en cuenta que la caída de presión a través del separador no es significativa para generar cambios sustanciales en las

propiedades del gas, por tal razón, se consideraron constantes. La dependencia térmica de la viscosidad, densidad y tensión interfacial de las fases se puede visualizar en las curvas de la Figura 5 a la Figura 8.

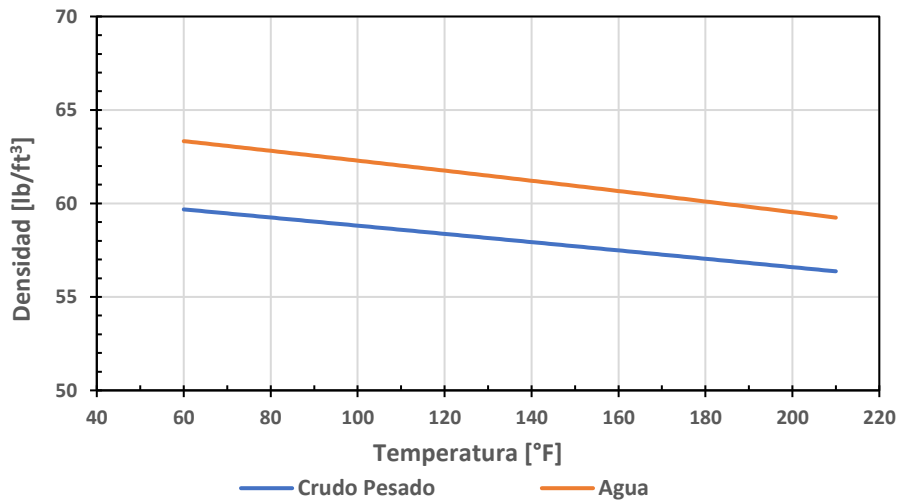
**Tabla 5**

*Propiedades fluidodinámicas para el gas, crudo pesado y agua*

Propiedad	Unidades	Gas	Crudo	Agua
Densidad	lb/ft <sup>3</sup> (kg/m <sup>3</sup> )	0,2188 (3,505)	57,49 (920,92)	60,99 (976,98)
Viscosidad	cP (Pa·s)	1,32e-02 (1,32e-05)	112,4 (0,1124)	0,3944 (3,944e-04)
Condiciones de Operación		Temperatura: 160 °F / Presión: 60 psig		
Tensión superficial interfacial @ condiciones del separador 160°F & 60 psig				
Interacción de fases				
Crudo pesado / Gas	0,03118	N/m	31,18	dina/cm
Agua / Gas	0,06396	N/m	63,96	dina/cm
Crudo pesado / Agua	0,04642	N/m	46,42	dina/cm

**Figura 5**

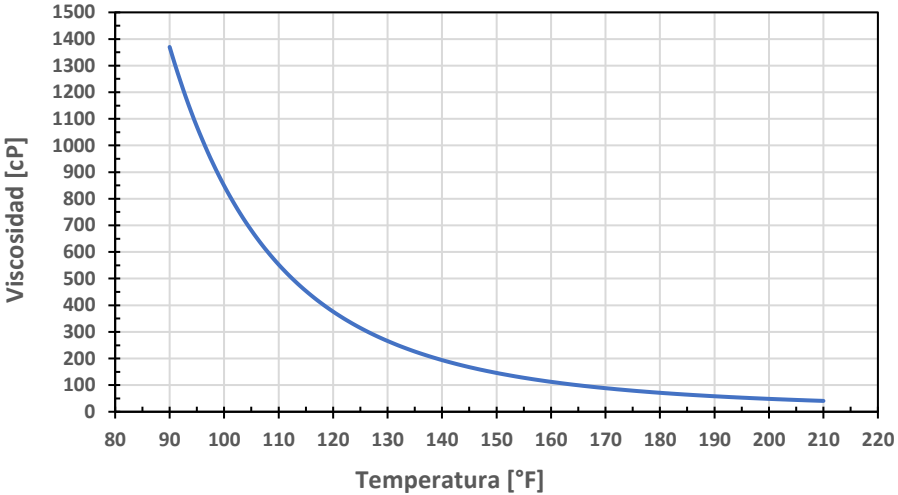
*Variación densidad fases líquidas en función de la temperatura*



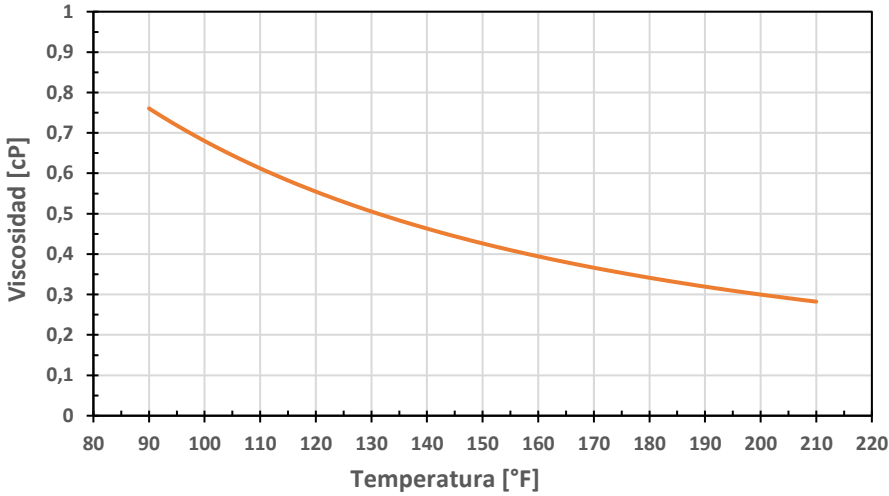
Cabe señalar que, la temperatura en el separador (160°F) es una condición de operación que influencia positivamente la separación de las fases líquidas en comparación con menores

temperaturas, pues mayor es la velocidad terminal de asentamiento de las gotas de agua desde la fase crudo, y asimismo, mayor es la velocidad vertical de ascenso de las gotas de crudo dispersas en el seno del agua.

**Figura 6**  
*Variación viscosidad en función de la temperatura. a) Crudo pesado. b) Agua*



(a)

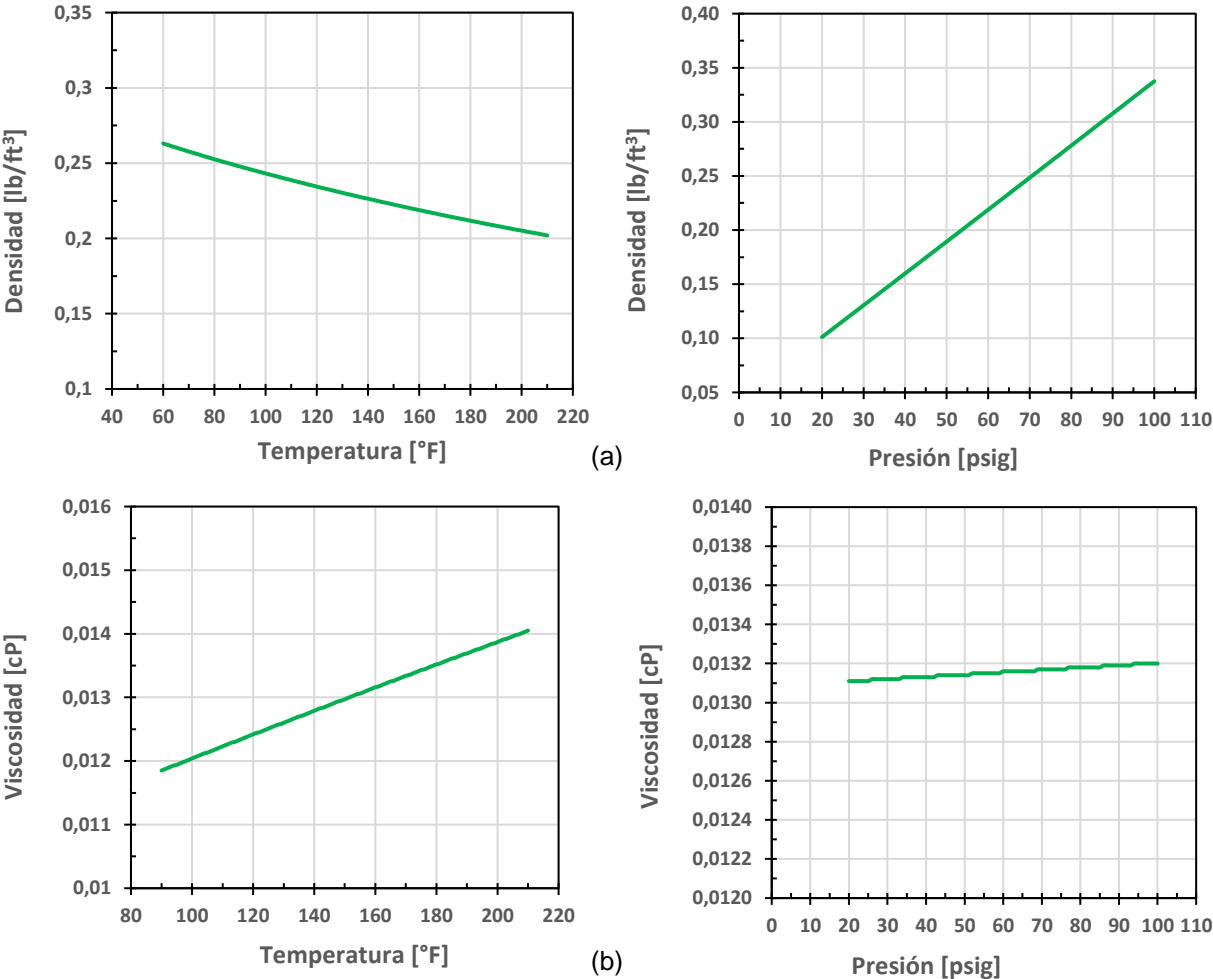


(b)

Con respecto a las propiedades del gas es necesario comentar que a medida que incrementa la temperatura la densidad decrece y la viscosidad aumenta, tal y como se puede apreciar en la

Figura 7. Así mismo, como es de esperarse la densidad del gas incrementa al aumentar la presión, sin embargo, detállese en la Figura 7(b) que la viscosidad presenta una ligera variación respecto a los cambios de presión; de esta manera, las propiedades del gas pueden ser asumidas constantes debido a que las pérdidas de carga a través del separador para esta fase son inferiores a 3 psi.

**Figura 7**  
*Variación propiedades de transporte del gas en función de la temperatura y presión.*  
a) Curvas de densidad. b) Curvas de viscosidad



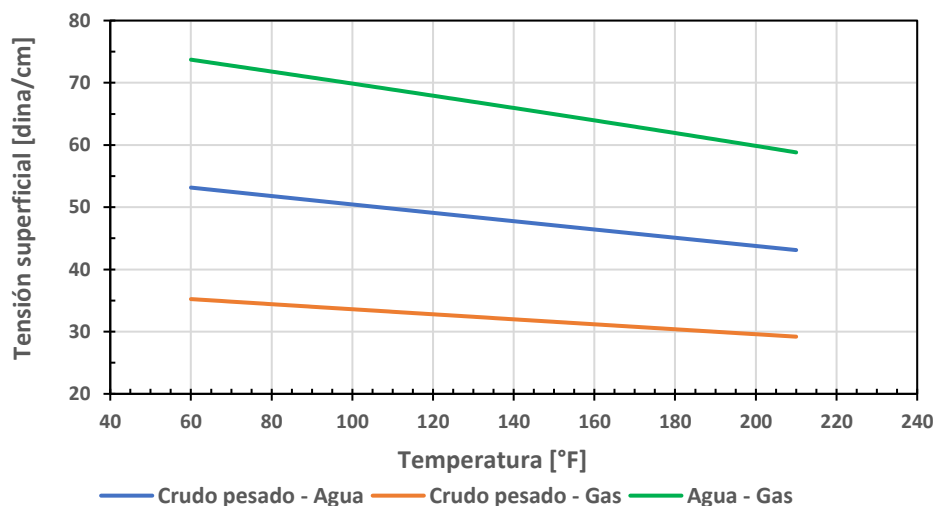
Los efectos de la temperatura y presión en las propiedades del gas son relevantes para entender la influencia de la densidad y viscosidad en los fenómenos de separación de las gotas

líquidas dispersas en la fase continua gas, pues generan variaciones de manera directa en la velocidad terminal de asentamiento, además de afectar directamente la eficiencia de remoción de niebla por impacto inercial en los eliminadores de niebla tipo malla o placas.

Otra propiedad física de interés para separaciones multifásicas, es la tensión interfacial porque considera las interacciones entre las fases al modelar la fuerza de tensión superficial, es decir, la fuerza que mantiene unidas las superficies de las diferentes fases como lo define Arnold & Stewart, (2008). La tensión interfacial del crudo y agua fue estimada empleando la metodología descrita por Pourahmadi Laleh, (2010). En la Figura 8 se muestra las tendencias de la reducción de la tensión superficial a medida que incrementa la temperatura para los pares de fases: crudo pesado/agua, crudo pesado/gas y agua/gas; por lo cual, se puede afirmar que la temperatura de operación (160 °F) del separador también promueve los fenómenos de separación debido a la menor fuerza interfacial entre las fases.

**Figura 8**

*Variación tensión superficial de las fases en función de la temperatura*



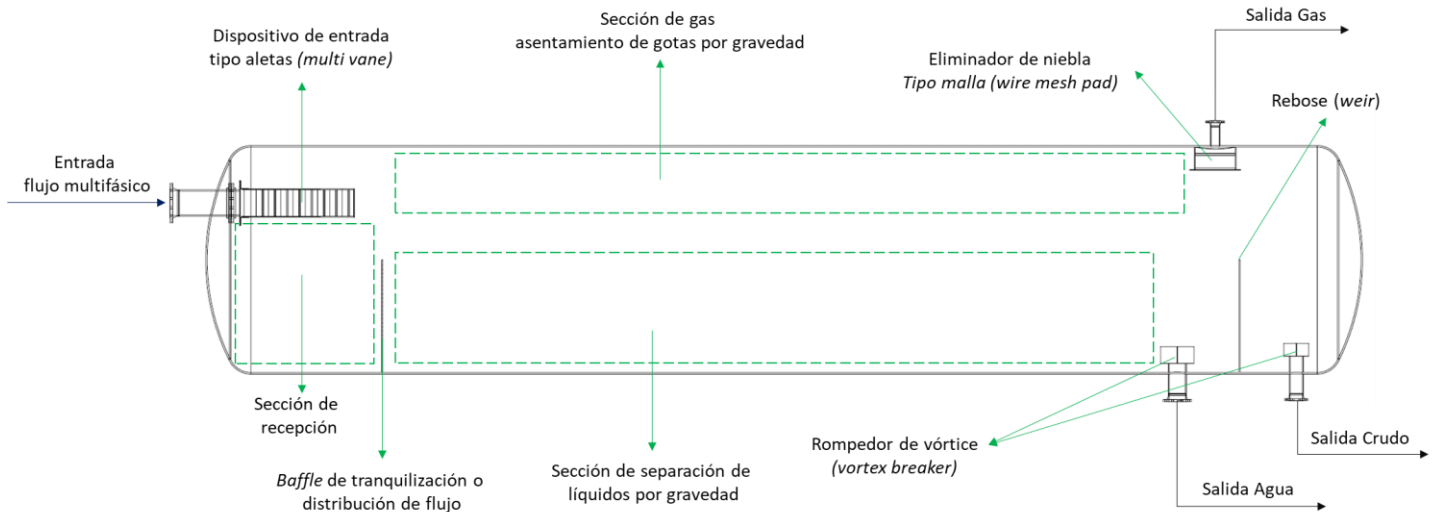
### 3.1.2 Construcción de la geometría en un modelo CAD

Con base en información de planos de dimensiones generales, planos de detalle de internos y modelo CAD mecánico, fue construido un modelo CAD en tres dimensiones (3D), con todos los componentes que tienen un efecto relevante en la fluidodinámica del equipo. Es necesario mencionar que en este modelo (geometría limpia) no se incluyen detalles mecánicos constructivos como sistema *sand jet and drain*, boquillas auxiliares, soportes y demás estructuras que no generan desviaciones considerables en los campos de velocidad y otras variables de interés.

En la Figura 9 se presenta el modelo CAD del separador donde se señala la ubicación de la configuración actual de internos, con las respectivas boquillas principales de proceso. Obsérvese que el equipo cuenta con un dispositivo de entrada tipo aletas (*multi vane*) para la reducción gradual de la cantidad de movimiento (momento) de la corriente de alimentación multifásica el cual promueve la separación primaria de gas y líquidos; un baffle perforado de tranquilización o distribución de flujo el cual reduce la turbulencia de la sección de entrada hacia la sección de separación de líquidos por gravedad, además de prevenir fenómenos de chapoteo (*sloshing*) dentro del separador y formación de espuma (*foaming*) en la interfase gas-crudo; un eliminador de niebla tipo malla de alambre (*wire mesh pad*) para reducir la carga de gotas de líquidos arrastrada en la corriente de gas hacia las unidades aguas abajo; un rebosadero tipo placa para control de interfases; y dos rompedores de vórtice (*vortex breaker*) tipo cruz para prevenir perturbaciones en las interfases y paso de gas hacia las líneas de salida de crudo y agua separadas (Jiménez et al., 2019).

**Figura 9**

Vista lateral modelo CAD separador SE-001COL configuración de internos

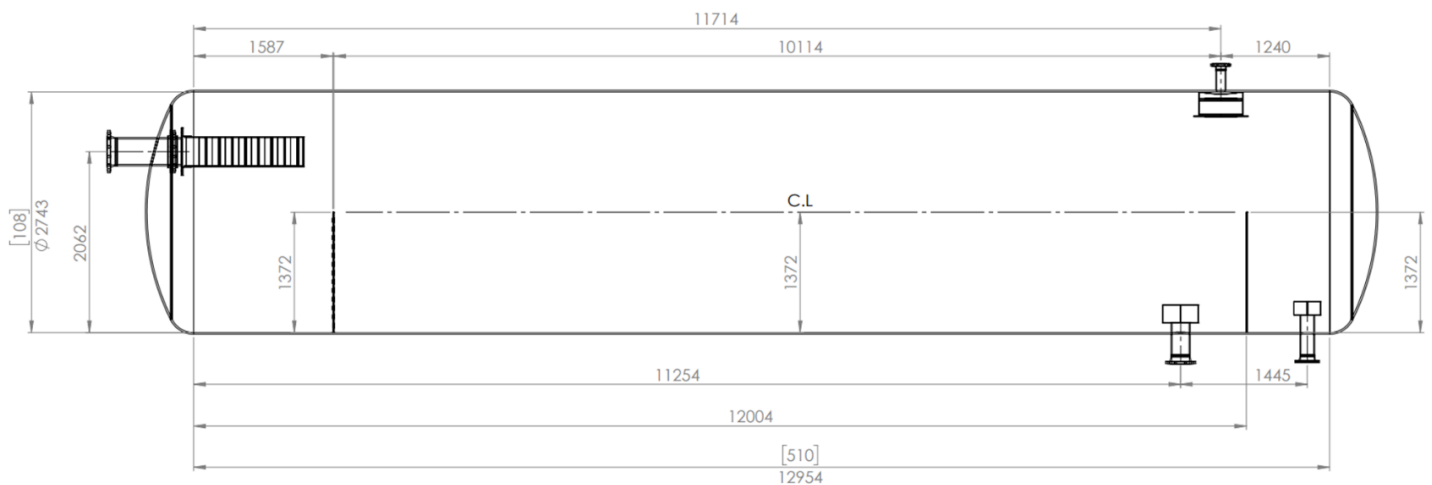


Cabe mencionar que, el separador trifásico SE-001COL es un recipiente (*vessel*) horizontal de 9 ft (108 in o 2,74 m) de diámetro y 42,5 ft (510 in o 12,95 m) de longitud costura a costura, tal y como se puede apreciar en el esquema general de dimensiones de la Figura 10.

**Figura 10**

Dimensiones generales separador primario horizontal SE-001COL

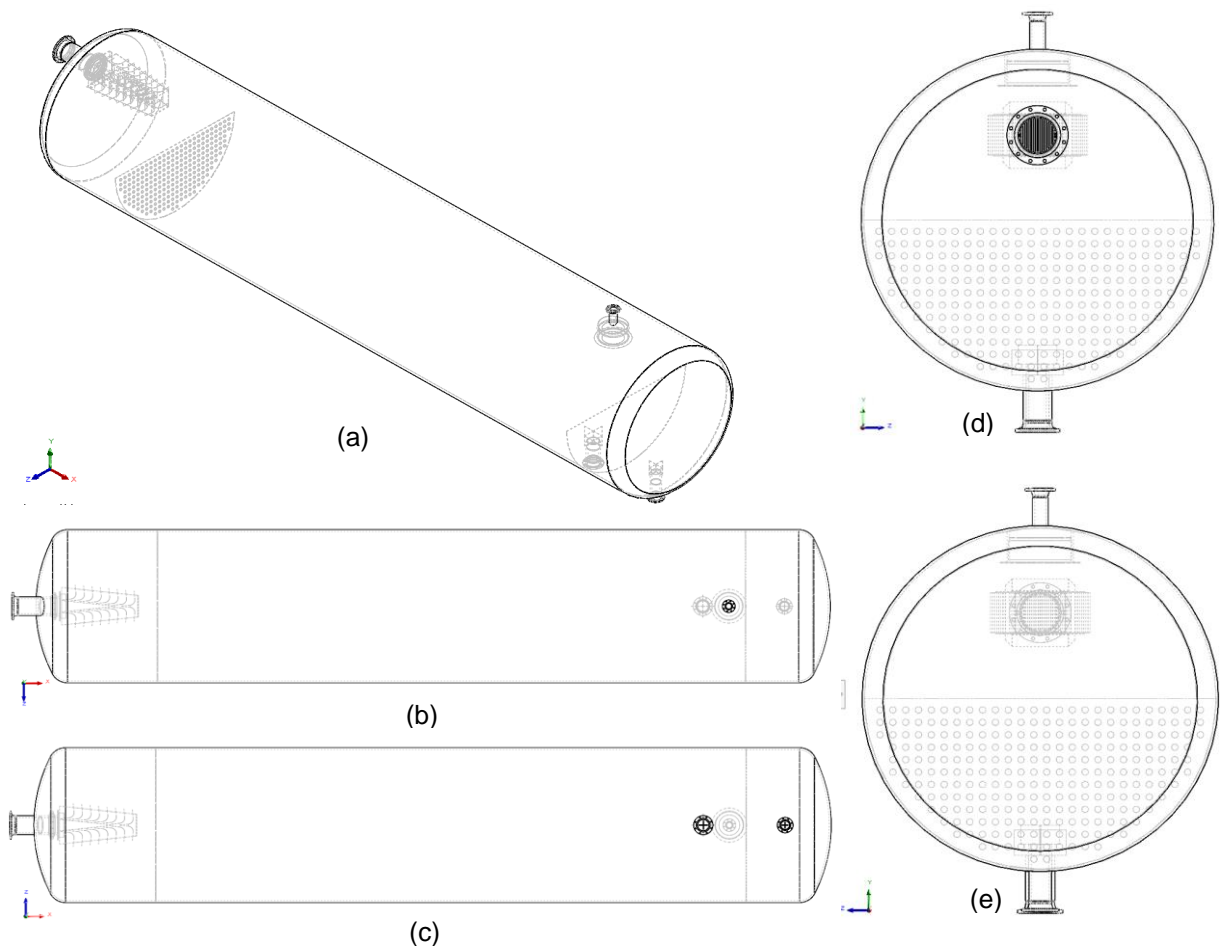
Dimensiones en mm, a menos que se indique [in]



En la Figura 11 y Figura 12 se presenta detalladamente el modelo CAD 3D del separador, donde es necesario comentar que: el dispositivo de entrada tipo aletas tiene 16 paletas curvadas, el baffle de distribución de flujo tiene un patrón de perforación cuadrado con orificios de 2 in y espesor de  $\frac{1}{2}$  in, la placa de rebose tiene un espesor de  $\frac{1}{2}$  in, los dos rompedores de vórtice tienen un espesor de 6 mm y cuentan con proyección interna de las boquillas de salida de agua y crudo, el eliminador de niebla tiene 6 in de espesor con hebras de 0,19 mm de diámetro donde la almohadilla malla de alambre está instalada horizontalmente en una carcasa cilíndrica (*housing*).

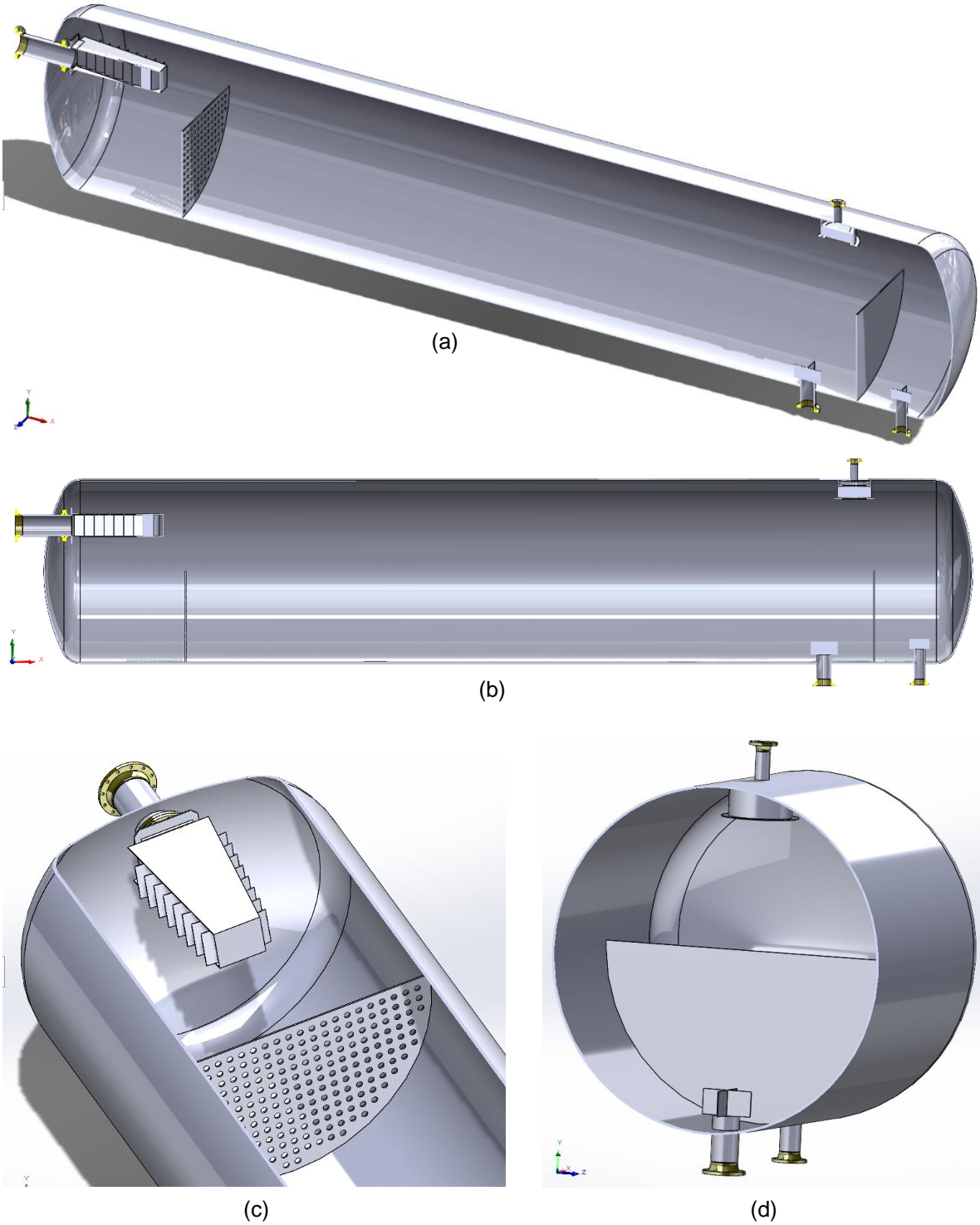
**Figura 11**

Modelo CAD 3D del separador trifásico SE-001COL, vista: a) Isométrica visualización estructura alámbrica. b) Superior. c) Inferior. d) Frontal. e) Posterior



**Figura 12**

*Detalle de internos modelo CAD 3D del separador trifásico SE-001COL. a) Corte longitudinal vista trimétrica. b) Corte longitudinal vista lateral. c) Corte longitudinal detalle sección de entrada. d) Corte transversal detalle sección de salida*

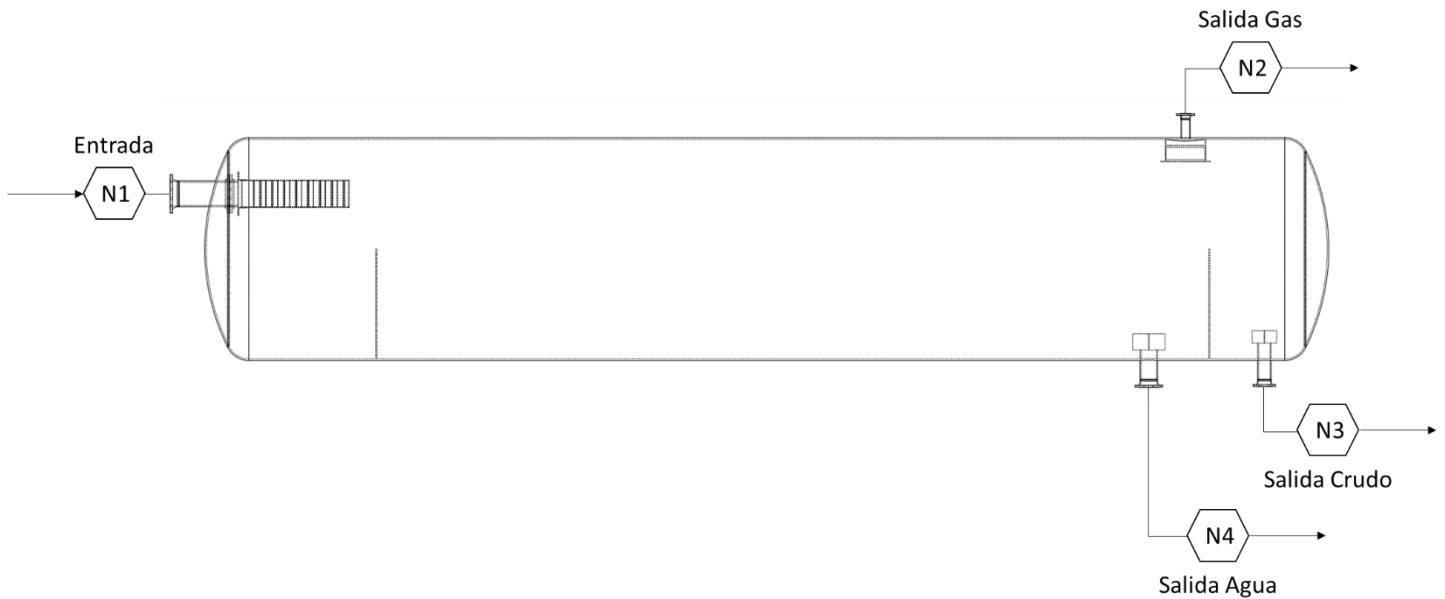


**3.1.3 Balance de masa separador SE-001COL**

En la Figura 13 se puede ver la ubicación de las entradas y salidas de los fluidos de proceso del separador, así como, la nomenclatura asignada para cada conexión. Los servicios asociados a cada boquilla con flujo de materia se muestran en la Tabla 6 donde se resalta las características y ubicación de las conexiones principales de proceso del separador.

**Figura 13**

*Esquema general de entrada y salidas de materia separador SE-001COL*



**Tabla 6**

*Lista de conexiones boquillas principales de proceso*

LISTA DE CONEXIONES								
POS.	CANT.	DIAM.	SCH.	TIPO	ELEVA.	ORIENT.	PROY.	SERVICIO
N1	1	12"	80	150#	2062 mm	0°	515 mm	Entrada fluido multifásico
N2	1	4"	80	150#	Tope	0°	300 mm	Salida de gas
N3	1	6"	80	150#	Fondo	180°	325 mm	Salida de crudo
N4	1	8"	80	150#	Fondo	180°	340 mm	Salida de agua

El balance de masa para las condiciones de operación especificadas por el campo se presenta en la Tabla 7, donde se consideró que el crudo se descarga en promedio con un 30% de BSW y el agua con un contenido de crudo de 2.500 ppm o 0,25% v/v.

**Tabla 7**  
*Balance de materia para el separador SE-001COL*

Condiciones de operación	Entrada – N1	Salidas		
		Gas – N2	Crudo - N3	Agua – N4
Flujo volumétrico total [BFPD]	25.000	-	10.650	14.350
Flujo volumétrico agua [BWPD]	17.500	-	3.186	14.314
Flujo volumétrico crudo [BOPD]	7.500	-	7.464	36
Flujo volumétrico gas [SCFD]	3.000.000	3.000.000	0	-
% BSW	70	-	29,91	99,75
Contenido de crudo [ppm]		-	-	2500
GOR [SCF/STB]	400	-	-	-
Temperatura [°F]			160	
Presión [psig]			60	

### 3.2 Pre-Procesamiento

En esta sección se presentan las diferentes etapas del preprocesamiento para el desarrollo del modelo CFD tridimensional (3D) del separador de estudio.

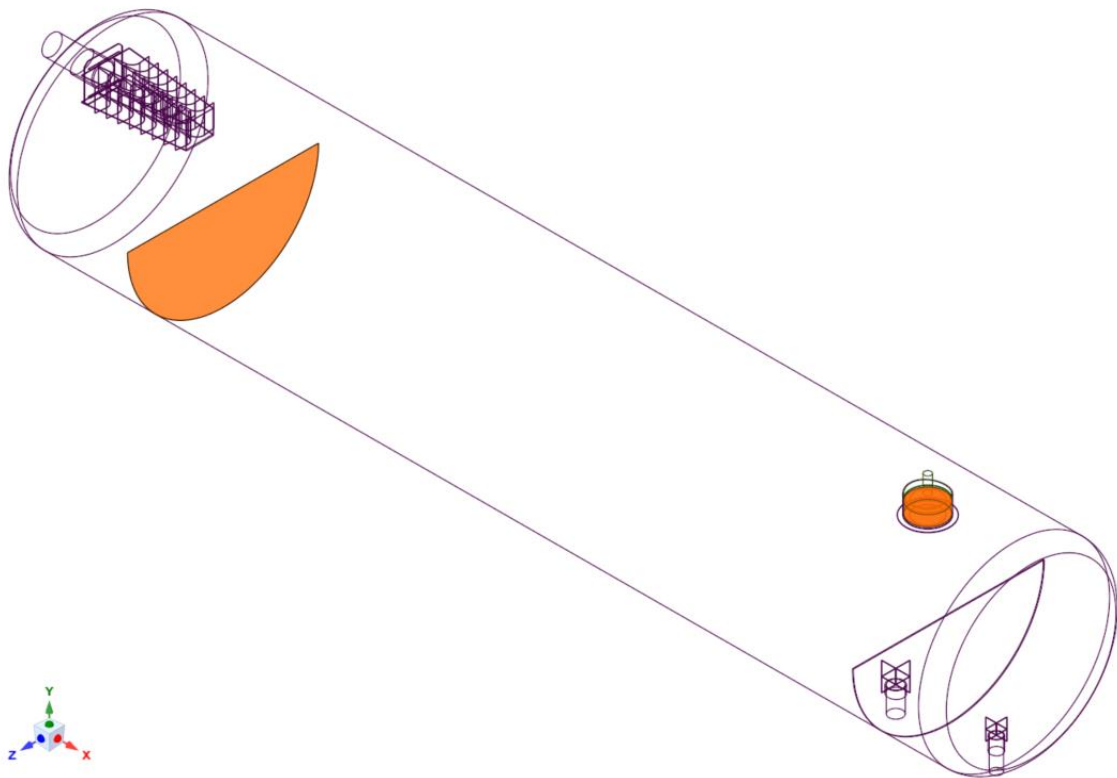
#### 3.2.1 Dominio fluido del separador

En un estudio CFD el dominio fluido o dominio computacional hace referencia a la región fluida, es decir, al espacio ocupado por los fluidos de proceso (gas, crudo y agua) en el interior del separador, este dominio es obtenido a partir del modelo CAD. El dominio fluido del separador se puede detallar en la Figura 14, nótese que, simplificaciones en la geometría se realizaron con

el fin de economizar costo computacional en las simulaciones (reducir el tamaño de malla), donde el baffle perforado y eliminador de niebla (resaltados en naranja) fueron aproximadas como zonas especiales de flujo mediante el modelo de medio poroso.

#### Figura 14

*Vista isométrica dominio fluido del separador SE-001COL*

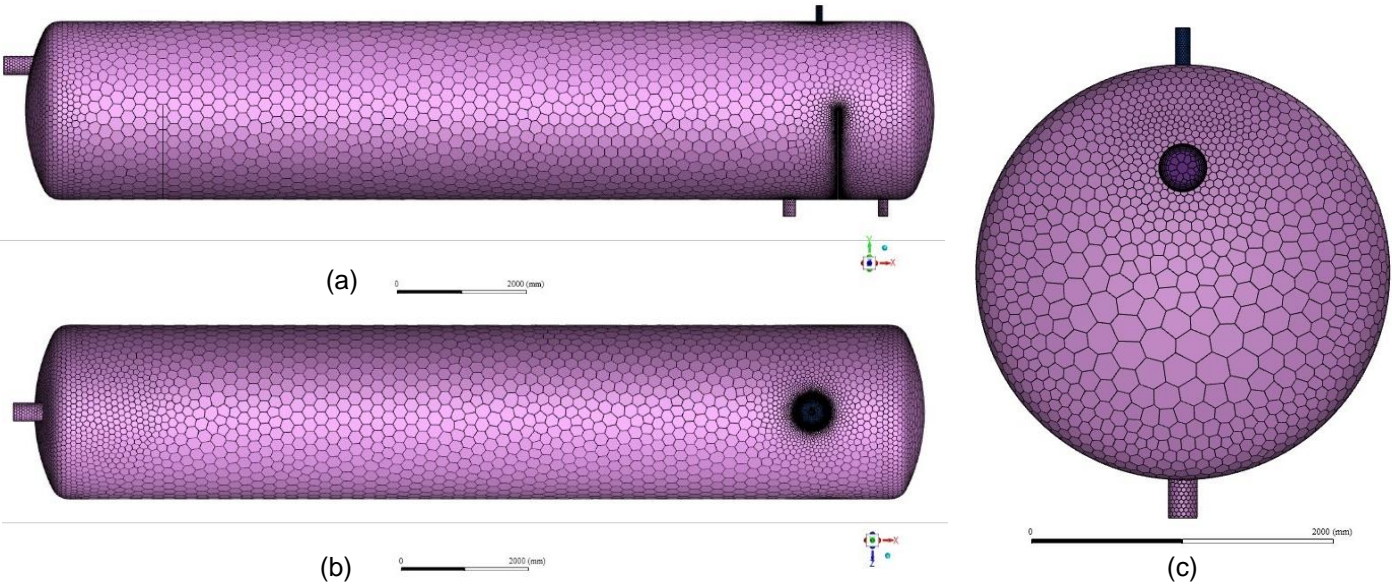


#### 3.2.2 Malla computacional tridimensional poliédrica

Para la generación de la malla computacional del dominio fluido se empleó la herramienta avanzada de discretización *Fluent Meshing*. Es pertinente destacar que la herramienta de mallado utilizada en el presente trabajo, es una de las tecnologías de discretización más avanzadas, la cual genera mallas con menor densidad y con mayor calidad de celdas con relación al mallado

convencional. La construcción de la malla consiste en dividir el dominio computacional en un número finito de pequeños subdominios con el objetivo de solucionar las ecuaciones de flujo dentro de la geometría que ha sido creada, resultando en la generación de celdas (volúmenes de control) que se superponen en el dominio geométrico creado. Así, las ecuaciones de flujo descritas en cada una de las celdas son solucionadas numéricamente, donde los valores discretos de las propiedades del fluido tales como velocidad, presión, temperatura, fracción volumétrica y otros parámetros de interés son determinados. A continuación, se presenta la malla construida para la discretización del dominio fluido del separador:

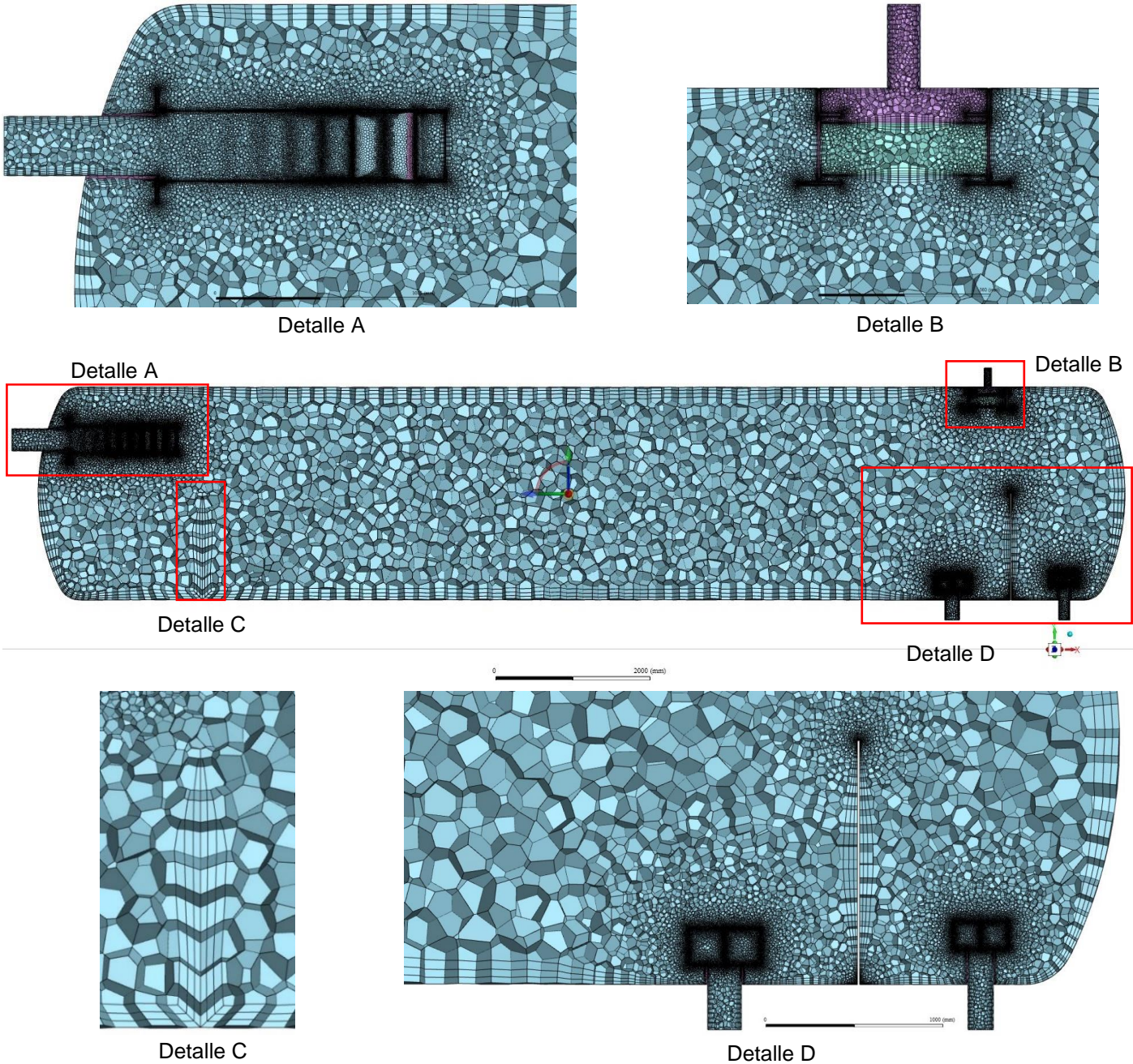
**Figura 15**  
*Malla superficial poliédrica, vistas: a) Lateral. b) Superior. c) Frontal*



Nótese que, en la Figura 15 se muestra la malla superficial poliédrica del separador, mientras que en la Figura 16 y Figura 17 se puede observar los detalles del refinamiento localizado

a través de cada uno de los dispositivos internos del equipo donde en las regiones próximas a las paredes se aprecia un aumento significativo de la densidad de malla.

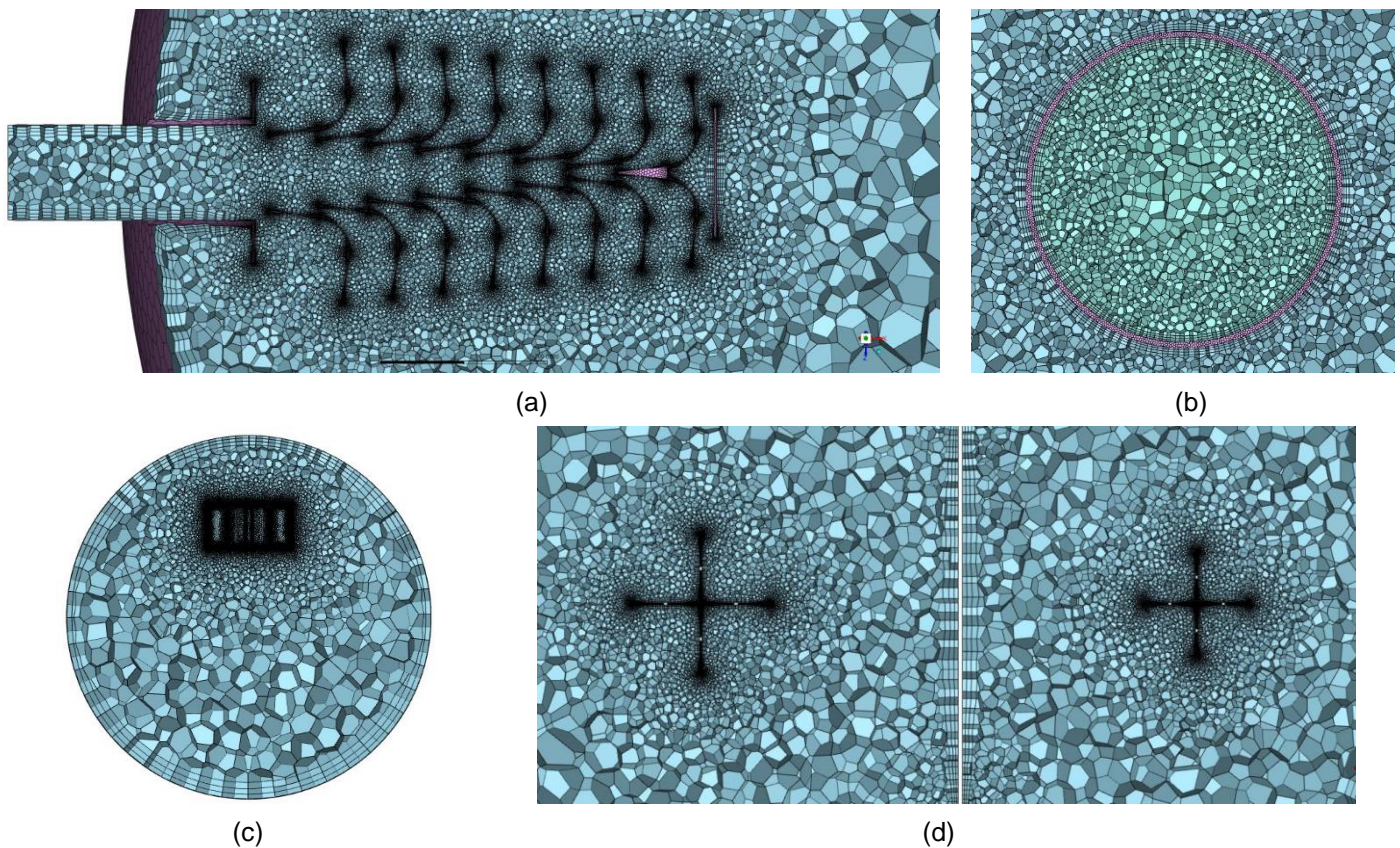
**Figura 16**  
*Malla tridimensional poliédrica detalles de refinamiento localizado, vista lateral corte longitudinal plano XY*



Es necesario resaltar que, los acercamientos mostrados en la Figura 16 permiten ver con mayor facilidad las capas de prismas en las paredes (incluyendo dispositivo tipo aletas, *baffle* de distribución de flujo, rebose, rompedores de vórtice y eliminador de niebla) y los elementos poliédricos en la región de flujo libre, donde es imperativo destacar que la topología de los elementos de la malla se ajusta de manera adecuada a los perfiles de: las aletas del dispositivo de entrada, eliminador de niebla y rompedores de vórtice tal y como se visualiza en la Figura 17.

### Figura 17

*Detalles refinamiento localizado, vistas: a) Superior corte longitudinal plano YZ altura media dispositivo de entrada. b) Superior corte longitudinal plano YZ altura media eliminador de niebla. c) Frontal corte transversal plano YZ sección media dispositivo de entrada. d) Superior corte longitudinal plano YZ altura media rompedores de vórtice*



Es importante aclarar que para la generación de la malla se definieron tres (3) regiones fluidas en el dominio computacional, la asignación de estas regiones es conveniente para facilitar las especificaciones del modelo de medio poroso en el eliminador de niebla; así las cosas, la región de flujo en este dispositivo fue denominada zona porosa, a partir de la cual se refieren las dos (2) regiones restantes como: aguas arriba y aguas abajo.

En general, la malla computacional del separador tiene un tamaño de 5.137.250 volúmenes de control y 19.097.296 nodos en el interior, con refinamiento de tres capas de prismas en todas las paredes. Las estadísticas de la calidad de los elementos de la malla se presentan en la Tabla 8, observándose que la malla posee una buena calidad de celdas (métricas por encima de los valores aceptables). El rango de valores para las diferentes calificaciones de calidad de malla puede ser consultada en la Figura 18.

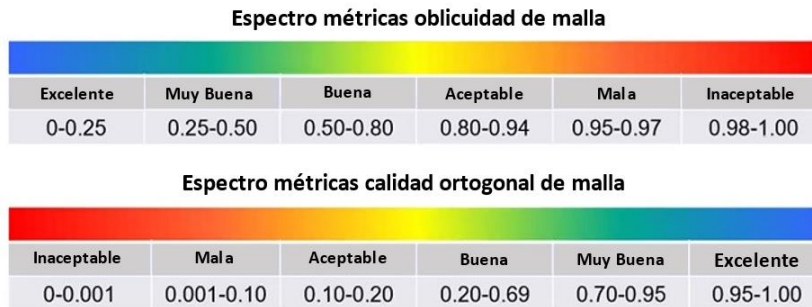
**Tabla 8**

*Estadísticas calidad de malla poliédrica para las 3 regiones fluidas del equipo*

Región	Métricas de calidad de malla								
	Oblicuidad (Skewness)			Calidad Ortogonal (Orthogonal Quality)			Relación de aspecto (Aspect Ratio)		
	Min.	Prom.	Max.	Min.	Prom.	Max.	Min.	Prom.	Max.
<i>Aguas arriba</i>	2,05E-05	0,0967	<b><u>0,5399</u></b>	<b><u>0,4600</u></b>	0,9032	0,9999	1,354	4,073	<b><u>44,76</u></b>
<i>Zona porosa</i>	5,04E-05	0,0941	<b><u>0,4427</u></b>	<b><u>0,5572</u></b>	0,9058	0,9999	1,423	4,360	<b><u>10,80</u></b>
<i>Aguas abajo</i>	5,04E-05	0,1277	<b><u>0,5398</u></b>	<b><u>0,4602</u></b>	0,8723	0,9999	1,395	4,670	<b><u>20,87</u></b>
Calidad elementos:	0-0,25	0-0,25	0,50-0,80	0,20-0,69	0,70-0,95	0,95-1,00	-	-	<100
Criterio de calidad	Excelente	Excelente	<b><u>Buena</u></b>	<b><u>Buena</u></b>	Muy Buena	Excelente	-	-	-

**Figura 18**

*Rango métricas de oblicuidad y calidad ortogonal, recomendaciones de calidad de malla buenas prácticas en CFD*



*Nota.* Adaptado de (ESSS, 2023)

Como aspecto relevante de señalar, se logró una apropiada discretización del dominio fluido del separador, lo que se refleja en la estabilidad del proceso de resolución numérica debido a la tendencia de la convergencia de los valores residuales como se muestra más adelante (ver Figura 23).

### **3.2.3 Configuración del modelo CFD del separador SE-001COL**

La solución de un problema de flujo multifásico empleando la técnica CFD requiere de la selección apropiada de los diferentes modelos (físicos y de turbulencia), propiedades de los materiales, condiciones de contorno, criterios de convergencia, condiciones iniciales, métodos y controles de solución, entre otros aspectos numéricos de acuerdo con el enfoque de modelamiento abordado para capturar los fenómenos de interés; por lo tanto, el criterio de selección para la configuración del modelo del separador se basó en experiencias pasadas y sugerencias encontradas en la literatura científica, donde para efectos de este proyecto se tuvieron en cuenta algunas características generales de los modelamientos de separadores multifásicos presentados por

diferentes trabajos (Ghaffarkhah et al., 2019; Prieto-Jiménez et al., 2021; Quiroga et al., 2021).

La configuración general del modelo CFD del separador SE-001COL se enuncia en la Tabla 9.

**Tabla 9**

*Configuración general modelo CFD separador trifásico SE-001COL*

Aspectos generales configuración modelo CFD		
Simulación	Análisis pseudo-transitorio	<i>Time step size</i> = 0,01 s
Aceleración de la gravedad	9,806 m/s <sup>2</sup>	En dirección -Y
Modelo multifásico	VOF ( <i>Volume Of Fluid</i> )	Tres fases (gas, crudo y agua)
Modelo de turbulencia	k-ε	Standard
Modelo de medio poroso	<i>Porous jump</i>	Para baffle de distribución de flujo
Modelo de medio poroso	<i>Zona porosa</i>	Para eliminador de niebla
Modelo de fase discreta	DPM ( <i>Discrete Phase Model</i> )	Rastreo de gotas de crudo y agua, rastreo de partículas de arena

La Tabla 10 lista las condiciones de contorno empleadas en la simulación del separador multifásico con las correspondientes especificaciones generales del tipo de frontera, donde de manera complementaria la Figura 19 ilustra la ubicación de los contornos en el dominio fluido.

**Tabla 10**

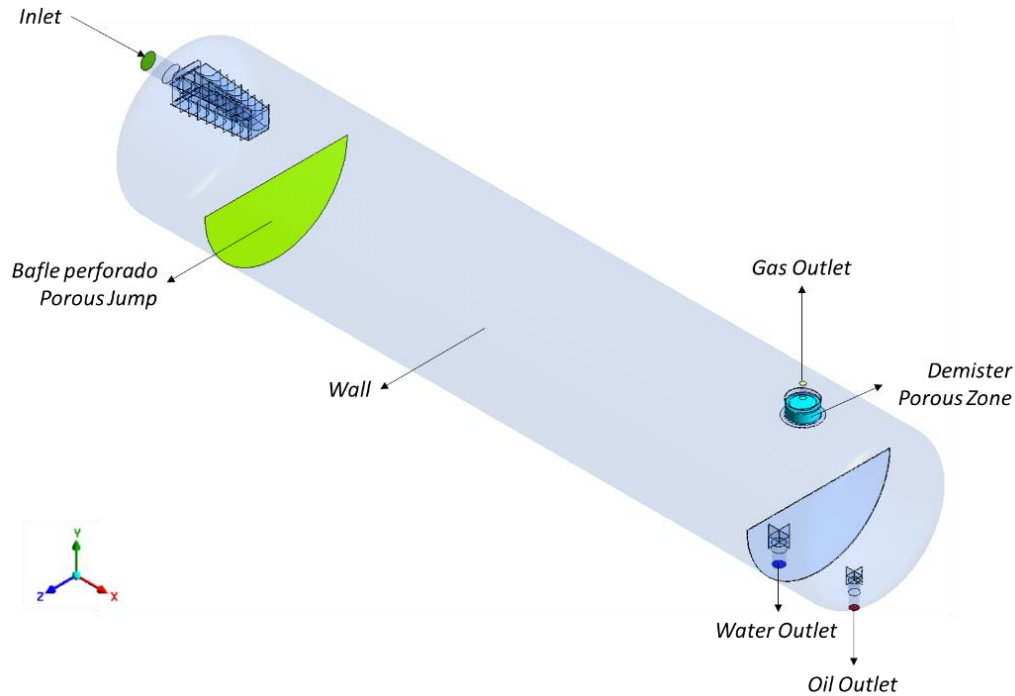
*Condiciones de frontera modelo CFD separador trifásico SE-001COL*

Condiciones de contorno						
Frontera	Especificación	Tipo	Valor	Régimen de flujo boquilla		Tipo Contorno
				Intensidad Turbulencia	Diámetro Hidráulico	Fase discreta
Inlet	Entrada flujo multifásico	Mass Flow-inlet	Gas: 0,802 [kg/s]	2,48 %	0,2889 [m]	Escapar
			Crudo: 13,192 [kg/s]			
			Agua: 32,32 [kg/s]			
Gas Outlet	Salida gas	Pressure-outlet	0 [Pa]	2,9 %	0,0972 [m]	Escapar
Water Outlet	Salida agua	Velocity-inlet*	- 0,963 [m/s]	3,2 %	0,1937 [m]	Escapar
Oil Outlet	Salida crudo	Velocity-inlet*	- 1,279 [m/s]	6,4 %	0,1463 [m]	Escapar
Wall	Pared	Wall (No slip wall)	-	-	-	Reflejar Coeficiente de reflexión: Normal: 0,1 Tangencial: 0,1

*Nota.* (\*) Usar “velocity-inlet” como condición de contorno de salida, es un artificio de simulación para fijar el caudal de salida.

**Figura 19**

*Especificaciones condiciones de contorno en el dominio fluido del separador*



Para no incurrir en un esfuerzo computacional excesivo e innecesario, el baffle perforado y el eliminador de niebla, fueron simplificados como zonas especiales de flujo empleando el modelo de medio poroso; con este abordaje se tiene en consideración la resistencia al flujo para aproximar conservativamente el comportamiento interno de los campos de velocidad de las fases, a través del separador. Los coeficientes de medio poroso fueron determinados usando el método de derivación basado en información de presión y velocidad.

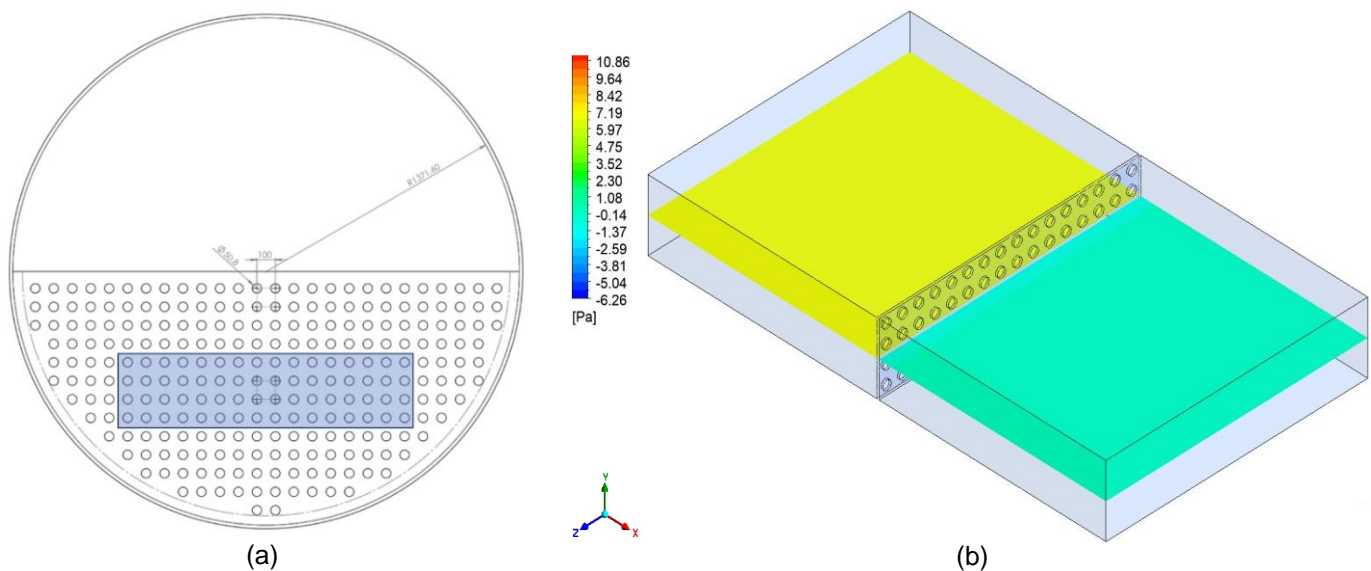
- **Modelo *Porous Jump* para simplificación del baffle perforado**

Es pertinente precisar que el modelo de *Porous Jump* es una simplificación unidimensional (1D) del modelo de medio poroso ampliamente utilizado para aproximar el flujo

a través de baffles o platos perforados. Los parámetros del *porous jump* se determinaron por medio de experimentación numérica a través de simulaciones CFD simplificadas para caracterizar la caída de presión en el baffle perforado en función de la velocidad de flujo. En la Figura 20 se presenta la sección simulada del baffle perforado donde cabe comentar que: el baffle tiene un patrón de perforación cuadrado con 252 orificios de 2 in con espaciamiento entre centros (*hole pitch*) de 100 mm, lo cual corresponde a una área activa o libre del 17,28%.

### Figura 20

Simulaciones CFD baffle perforado. a) Sección simulada extracción dominio fluido simplificado. b) Contornos de presión flujo de crudo corte longitudinal plano XZ



Para agilizar la caracterización del perfil de la caída de presión a través de la sección del baffle en función de la velocidad de flujo, los recursos de automatización del software fueron usados para construir un análisis paramétrico con cinco puntos de diseño. En éste se definió la velocidad superficial de entrada como parámetro de entrada, mientras la caída de presión se

estableció como parámetro de salida. En la Tabla 11 se reportan los resultados para los puntos de operación simulados, abarcando un rango de flujo aproximado de 8 a 29 KBFPD a través del bafle perforado del separador. Los valores resaltados comprenden la información experimental numérica de interés, la cual es graficada en la Figura 21 para visualizar la tendencia de la pérdida de carga en el bafle a medida que incrementa la velocidad.

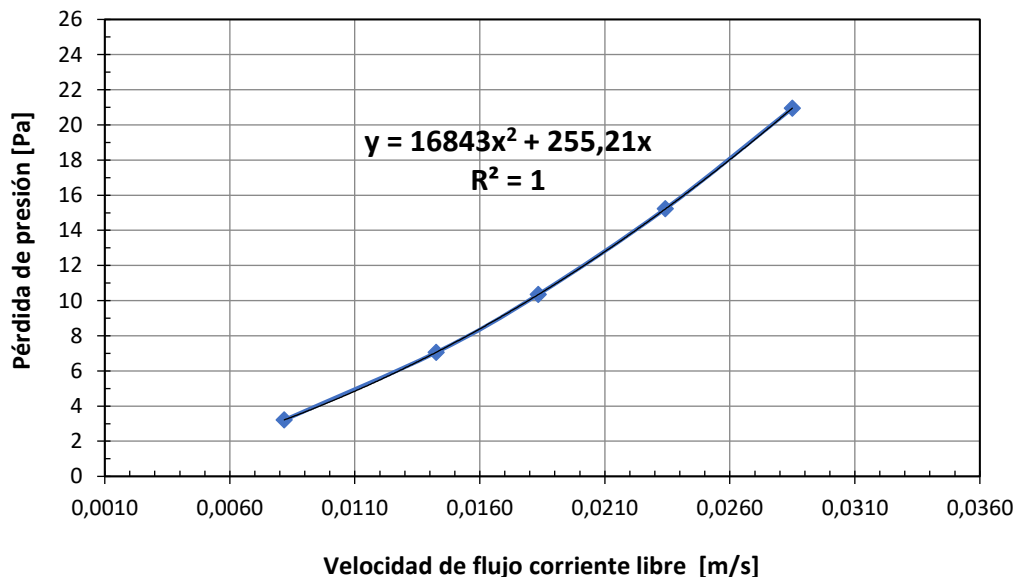
**Tabla 11**

*Caracterización pérdida de carga a través del bafle perforado del separador*

Datos experimentales numéricos caída de presión en función de la velocidad de entrada					
Caudal, Q		Velocidad de entrada, V		Caída de Presión, ΔP	
BFPD	Am <sup>3</sup> /s	ft/min	m/s	psi	Pa
8178	0,015049	1,610	<b>0,008179</b>	0,000465	<b>3,2056</b>
14259	0,026238	2,807	<b>0,014260</b>	0,001024	<b>7,0568</b>
18337	0,033743	3,610	<b>0,018339</b>	0,001501	<b>10,351</b>
23417	0,043091	4,610	<b>0,023419</b>	0,002209	<b>15,228</b>
28497	0,052438	5,61	<b>0,028499</b>	0,003038	<b>20,943</b>

**Figura 21**

*Perfil de caída de presión sección bafle perforado del separador SE-001COL*



Los datos experimentales numéricos de presión contra velocidad fueron ajustados por medio de una expresión polinómica de grado 2 como lo deja ver la Figura 21. Detállese que, el ajusta a la tendencia tiene un alto grado de precisión y que la expresión obtenida puede escribirse en términos de la ecuación de tipo Hazen-Dupuit-Darcy (1), tal y como se muestra en la ecuación (2). No sobra mencionar que la ecuación (1) modela la caída de presión que experimenta un fluido al pasar a través de un medio poroso que tiene un espesor finito.

$$\frac{\Delta P}{\Delta m} = -\left(\frac{\mu}{\alpha}v + C_2 \frac{1}{2}\rho v^2\right) \quad (1)$$

Donde:

$\Delta P$  = Caída de presión en el medio poroso,  $Pa$ .

$\mu$  = Viscosidad laminar del fluido,  $Pa \cdot s$ .

$1/\alpha$  = Coeficiente o factor de resistencia viscosa,  $1/m^2$ .

$C_2$  = Coeficiente o factor de resistencia inercial,  $1/m$ .

$\rho$  = Densidad del fluido,  $Kg/m^3$ .

$v$  = Velocidad normal a la cara porosa,  $m/s$ .

$\Delta m$  = Espesor del medio,  $m$ .

$$\frac{\Delta P}{\Delta m} = 16.843 v^2 + 255,21 v \quad (2)$$

Realizando el respectivo tratamiento matemático de despeje y considerando las propiedades del crudo, se estiman los parámetros del *porous jump* para el baffle perforado del separador trifásico con un área libre del 17,28%, donde el coeficiente *pressure jump* ( $C_2$ ) y la permeabilidad de la cara del medio ( $\alpha$ ) son reportados en la Tabla 12. Es necesario dejar constancia que simulaciones CFD para flujo de agua también fueron realizadas para caracterizar el perfil de

pérdida de presión a través de la sección del bafle perforado, no obstante, para la especificación de la condición de contorno del *porous jump* se utilizaron los datos obtenidos para el crudo para considerar el escenario más restrictivo de pérdida de carga, pues se debe tener en cuenta que a través del bafle fluyen diferentes fases (crudo y agua).

**Tabla 12**

*Parámetros porous jump para modelamiento simplificado del bafle perforado*

<b>Datos de entrada</b>
Coeficiente <i>pressure jump</i>
$C_2 = 2.880,21 [1/m]$
Permeabilidad de la cara del medio
$\alpha = 5,593E-06 [m^2]$

- **Modelo Medio Poroso para simplificación del eliminador de niebla**

De acuerdo con la hoja de datos del eliminador de niebla instalado en el separador, para determinar la pérdida de presión a través de la malla de alambre en función de la velocidad del gas se empleó la correlación empírica proporcionada por el fabricante, la cual se presenta en la ecuación (3). Con respecto al eliminador de niebla se debe comentar que: la malla es tejida en alambre de metal (coeficiente de fricción de 1,5 para malla de metal) con diámetro de hebra de 0,19 mm, el espesor de la almohadilla es de 6 in (0,15 m), la fracción vacía es del 0,9765 y el área superficial específica es de 484 m<sup>2</sup>/m<sup>3</sup>.

$$\Delta P = \frac{fV_g^2 H \rho_g (1 - \epsilon)}{G_c D_w} * 9,81 \quad (3)$$

Donde:

$\Delta P$  = Pérdida de presión,  $Pa$ .

$f$  = Coeficiente de fricción de malla tejida al gas.

$V_g$  = Velocidad de operación del gas,  $m/s$ .

$G_c$  = Aceleración gravitacional,  $m/s^2$ .

$H$  = Espesor de la almohadilla del eliminador de niebla,  $m$ .

$D_w$  = Diámetro de alambre de la almohadilla del eliminador de niebla,  $m$ .

$\rho_g$  = Densidad del gas,  $Kg/m^3$ .

$\epsilon$  = Fracción vacía de la almohadilla del eliminador de niebla.

Con base en la correlación empírica (3) y los datos específicos del modelo de eliminador de niebla montado en el separador, en la Tabla 13 se resumen los cálculos asociados de la caída de presión respecto a la velocidad de operación del gas donde se abarcó la ventana operativa del eliminador para la retención de gotas de líquido por impacto o choque inercial (rango de 0,64 a 3,2 m/s).

**Tabla 13**

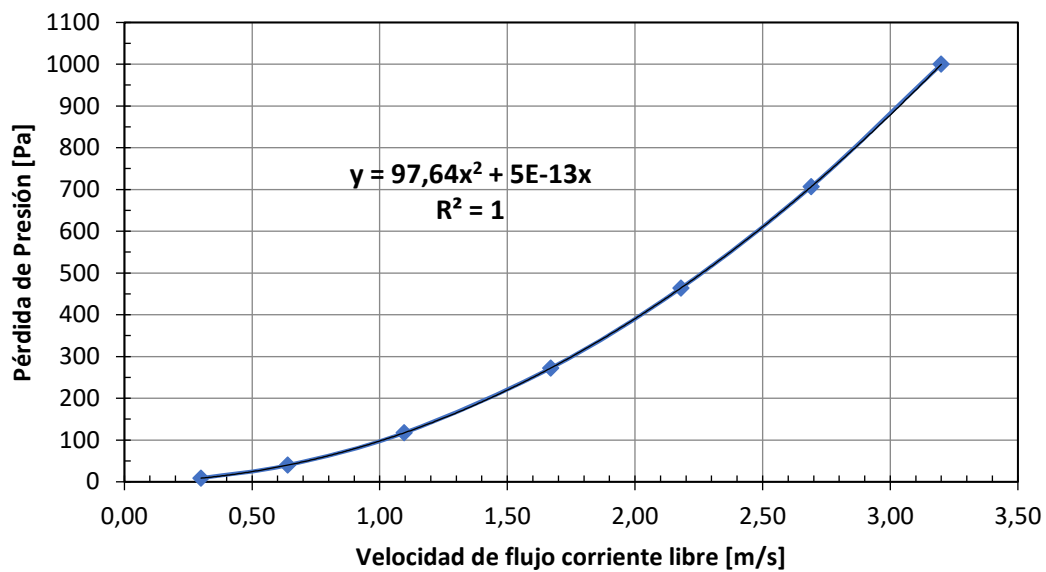
*Caracterización pérdida de carga del gas a través del eliminador de niebla*

Datos caída de presión en función de la velocidad de operación del gas correlación empírica						
MMSCFD	Caudal, Q		Velocidad de entrada, V		Caída de Presión, $\Delta P$	
	$Am^3/h$	$Am^3/s$	ft/s	m/s	psi	Pa
0,738	202,7	0,0563	0,984	<b>0,300</b>	0,001275	<b>8,79</b>
1,576	432,5	0,1201	2,100	<b>0,640</b>	0,005801	<b>39,99</b>
2,700	741,0	0,2058	3,598	<b>1,097</b>	0,017032	<b>117,43</b>
4,112	1128,5	0,3135	5,479	<b>1,670</b>	0,039495	<b>272,31</b>
5,368	1473,1	0,4092	7,152	<b>2,180</b>	0,067301	<b>464,02</b>
6,622	1817,7	0,5049	8,825	<b>2,690</b>	0,102474	<b>706,53</b>
7,878	2162,3	0,6006	10,499	<b>3,200</b>	0,145014	<b>999,83</b>

De manera similar al procedimiento del bafle perforado, los datos resaltados de caída de presión y velocidad de la Tabla 13 fueron ajustados a la tendencia mostrada en la Figura 22, la cual puede ser expresada como la ecuación (4).

**Figura 22**

*Perfil de caída de presión del gas en el eliminador de niebla del separador*



$$\frac{\Delta P}{\Delta m} = 97,64 v^2 + 5 * 10^{-13} v \quad (4)$$

Así, a partir de la ecuación (4) y considerando las propiedades del gas, se derivan los parámetros del modelo de medio poroso para el modelamiento del eliminador de niebla del separador trifásico SE-001COL el cual tiene una porosidad del 97,65%, donde los valores de los coeficientes o factores de resistencia inercial ( $C_2$ ) y viscosa ( $1/\alpha$ ) son consignados en la Tabla 14.

**Tabla 14***Coefficientes modelo medio poroso para simplificación eliminador de niebla*

<b>Datos de entrada</b>
Coeficiente o factor de resistencia inercial
$C_2 = 371,43 \text{ [1/m]}$
Coeficiente o factor de resistencia viscosa
$1/\alpha = 2,525\text{E-}07 \text{ [1/m}^2\text{]}$

### 3.3 Solución computacional

En general, los fenómenos físicos fundamentales en el flujo de fluidos son no lineales lo cual requiere el tratamiento del fenómeno a ser solucionado a través de una solución iterativa, donde las ecuaciones diferenciales parciales que describen el movimiento de los fluidos son discretizadas en un sistema de ecuaciones algebraicas y resueltas para cada volumen de control.

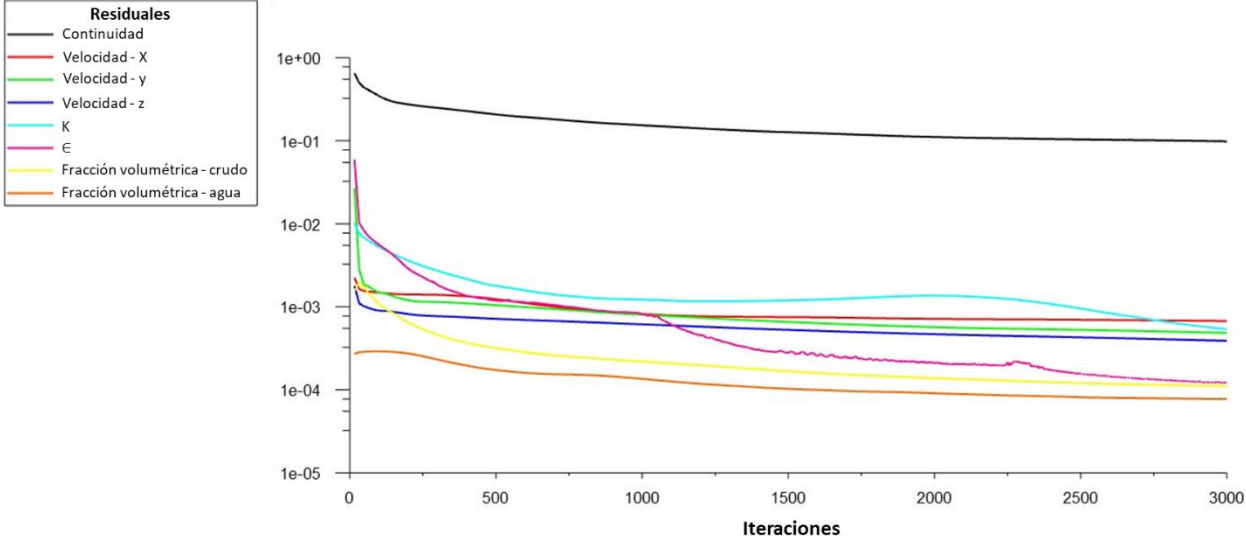
En primer lugar, el enfoque de modelamiento abordado para capturar los fenómenos de interés en la solución de los problemas de flujo multifásico es clave la selección de un *solver* (solucionador) adecuado, así como, las especificaciones de los esquemas de interpolación en la discretización especial en los métodos de solución y las definiciones apropiadas de los controles de solución para la estabilidad de la convergencia en la resolución iterativa. En segunda instancia, el procedimiento iterativo requiere que todos los valores discretos de las propiedades de flujo, tales como velocidad, presión, temperatura, fracción volumétrica y otros parámetros sean inicializados antes de calcular la solución. La convergencia es evaluada por el seguimiento progresivo de los errores en los balances de masa, momento y energía durante el avance de los

cálculos numéricos de las ecuaciones de conservación o transporte a través de cada paso de iteración, esta medida del error es comúnmente conocida como residuales.

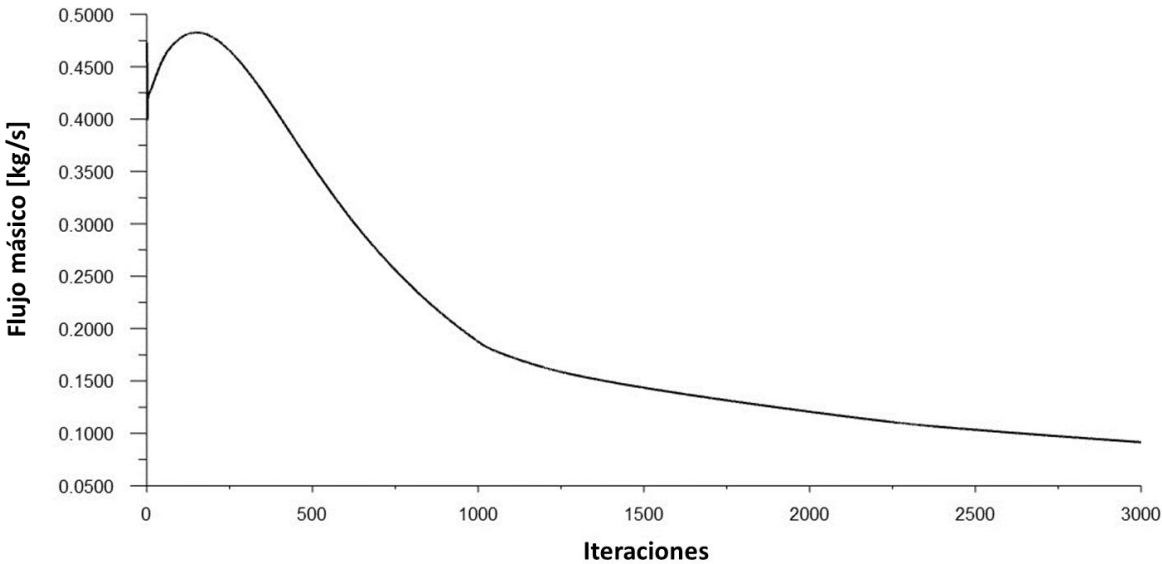
Un ejemplo de la convergencia parcial de las iteraciones en el proceso de resolución numérica es mostrado en la Figura 23. Así la convergencia es alcanzada cuando los residuales de las ecuaciones de continuidad, momento y energía caen por debajo del algún criterio de convergencia, el cual para la simulación del separador fue de  $1 \times 10^{-3}$ . Este criterio de convergencia es el más ampliamente aceptado para la mayoría de los problemas en ingeniería, debido a la complejidad de los sistemas de estudio como lo es el caso del separador trifásico modelado en este trabajo.

De forma complementaria para garantizar que los resultados obtenidos por medio de análisis CFD sean confiables y que representen apropiadamente los fenómenos físicos involucrados, se manejaron 2 criterios adicionales para aceptar los resultados; de acuerdo con las buenas prácticas en CFD, el cierre del balance de masa debe estar por debajo del 1%, como se puede apreciar en la Figura 24 esta restricción es cumplida, así mismo, se debe alcanzar una condición de estabilidad física, por ello, la Figura 25 permite ver como la caída de presión a través del separador logra una condición constante a medida que avanzan las iteraciones.

**Figura 23**  
*Ventana de monitoreo para el avance de la convergencia de los residuales*

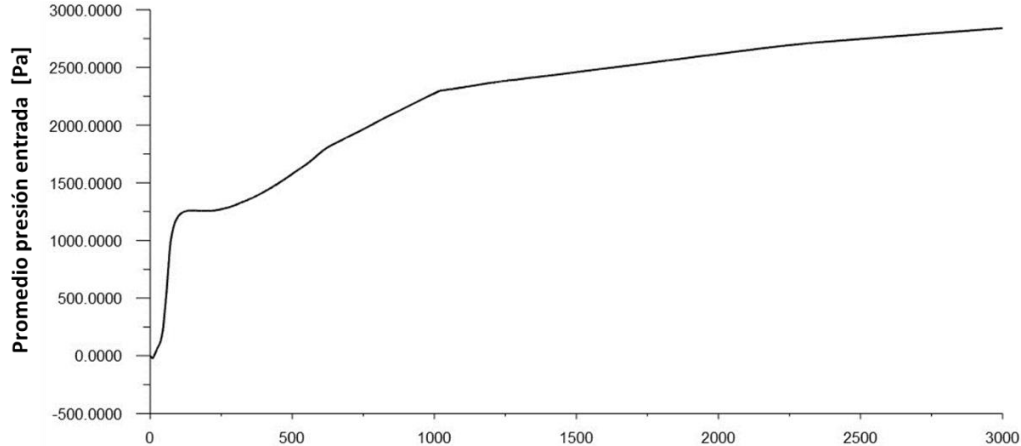


**Figura 24**  
*Ventana de monitoreo para el balance de masa en el proceso iterativo de resolución numérica para el separador trifásico SE-001COL*

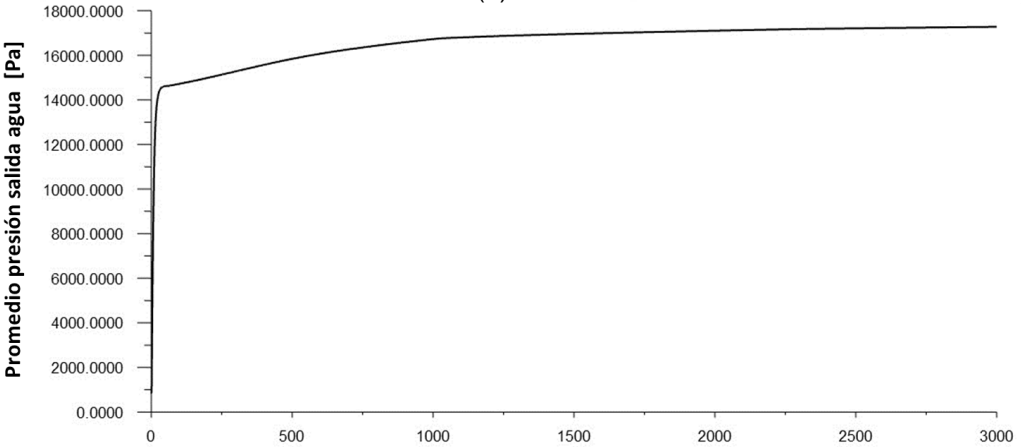


**Figura 25**

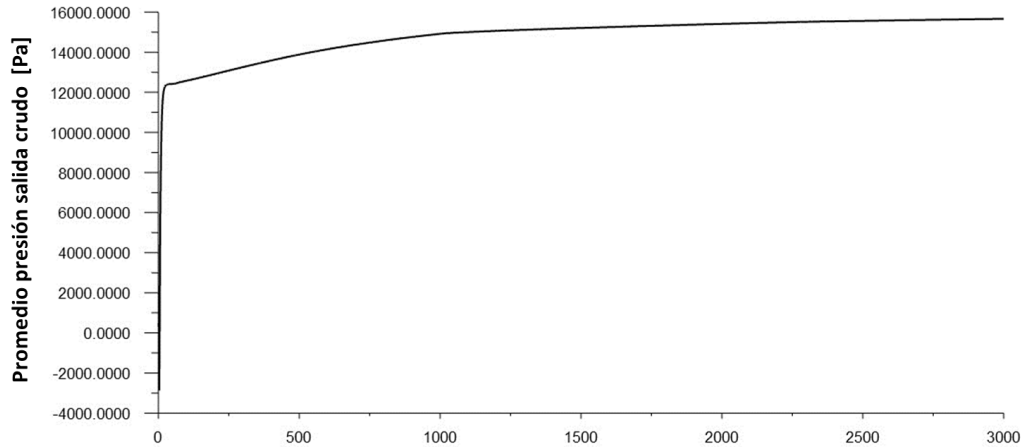
*Ventana de monitoreo estabilidad física en el proceso iterativo de resolución numérica para el separador trifásico SE-001COL. a) Presión en contorno de entrada. b) Presión en contorno de salida agua. c) Presión en contorno de salida crudo*



(a) Iteraciones



(b) Iteraciones



(c) Iteraciones

### 3.4 Pos-Procesamiento – Resultados

En esta sección se presentan los resultados de la simulación del separador trifásico SE-001COL, a las condiciones de operación especificadas por el campo. Para tener un entendimiento de las características de flujo se emplearon mapas de contornos, isosuperficies, representación de volumen, líneas de corriente y gráficos de vectores, así como, un análisis preliminar DPM (*Discrete Phase Model*) para determinar el comportamiento de las fases secundarias por medio del rastreo de gotas/partículas de crudo, agua y arena.

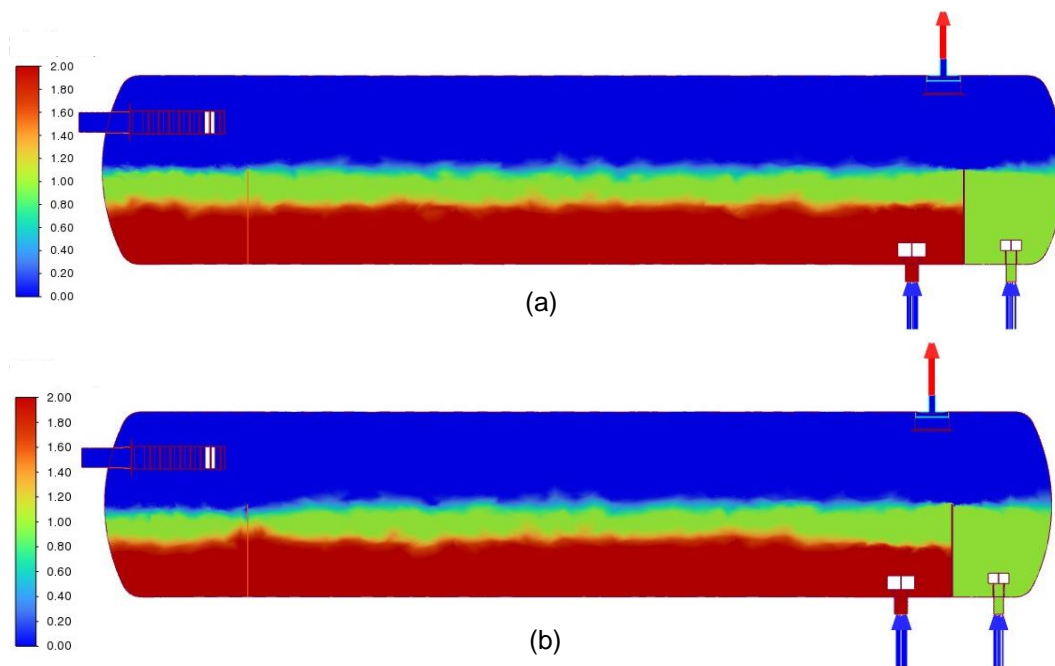
Para visualizar la distribución de las fases en el separador multifásico, contornos de fracción volumétrica de gas (azul), crudo (verde) y agua (rojo) se graficaron en un plano lateral “XY” tal y como se presenta en la Figura 26. Un aspecto particular es que se observan ligeras difusiones numéricas a nivel de las interfases debido al tamaño de los elementos en estas regiones (a pesar que el dominio computacional tiene una discretización de 5.137.250 volúmenes de control y emplearse un esquema de interpolación de fracción volumétrica implícito robusto como el *Modified HRIC*), lo cual no representa una desviación sustancial para la predicción de la distribución de las fases siendo aceptable para los propósitos de este proyecto.

De esta manera, los contornos de la Figura 26(a) muestran la condición inicial de las fases donde se evidencia que el gas ocupa la sección media del separador horizontal, lo que indica que el equipo fue dimensionado para una operación con el 50% de líquido (*half full*). Así, la altura o nivel de la interfase gas/líquido fue definida en 1,376 m, mientras que el nivel de la interfase crudo/agua fue especificada a 0,853 m. En contraste, la Figura 26(b) revela la condición final de

las fases en el separador en estado estacionario, donde claramente se aprecian cambios particulares de la interfase gas/crudo en la sección de entrada y próxima al bafle perforado, así como, en la interfase crudo/agua en la sección cercana al rebose en la salida de agua.

### Figura 26

Comparación de la distribución de las fases dentro del separador trifásico SE-001COL.  
a) Condición inicial interfases. b) Condición final interfases en estado estacionario



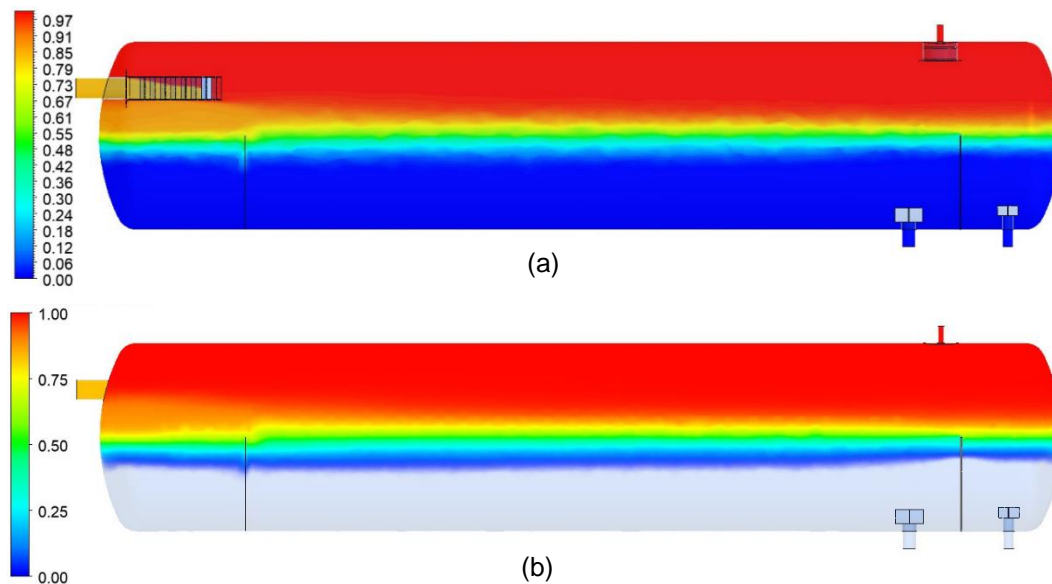
Con el propósito de mejorar la interpretación de los resultados las fracciones volumétricas de cada una de las fases en el separador se graficó como se puede ver en la Figura 27 a Figura 29. La comparación de la distribución de las fases por medio de los contornos y la representación de volumen permite apreciar con facilidad de manera cualitativa la separación generada por el dispositivo de entrada, dado, el contraste de la gama de colores asociada a la escala.

Detállese que, la fracción volumétrica de la Figura 27 evidencia que el gas no es separado completamente en el dispositivo de entrada, por lo que una fracción remanente de gas permanece en la corriente descendente de líquidos (ver tonalidad naranja), originando la presencia leve de gas, por debajo del nivel superior del baffle perforado y rebose. Por su parte, la fracción volumétrica de la Figura 28 deja ver una reducción apreciable del espesor del colchón de crudo debido a la presencia de fracciones de gas como de agua (ver Figura 29). Adicionalmente, como lo muestra la Figura 28 y Figura 29 la interfase crudo/agua en la región cercana al rebose es ligeramente arrastrada por la salida de agua.

### Figura 27

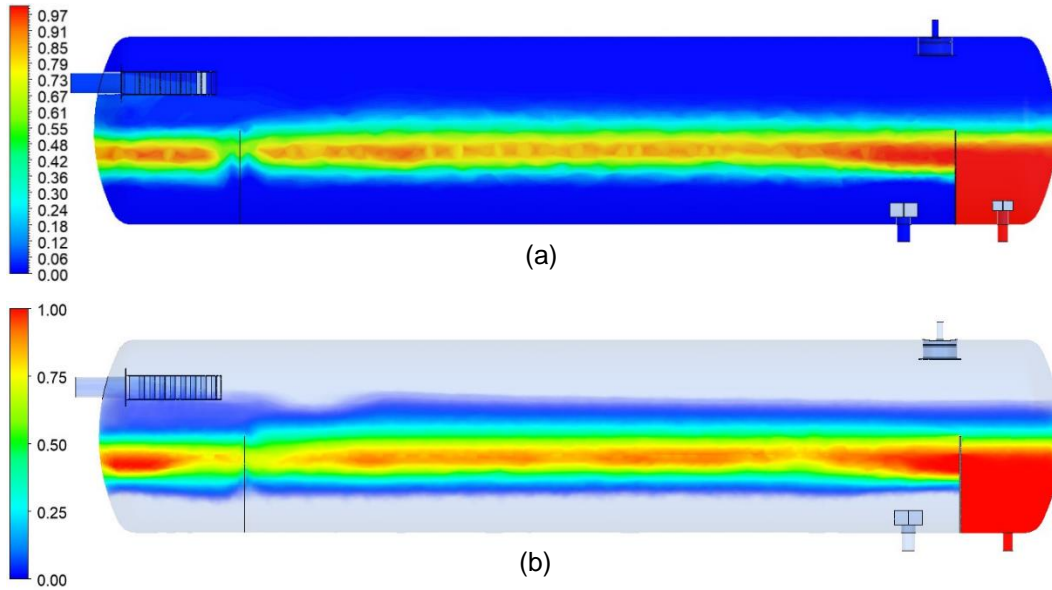
*Comparación fracción volumétrica de gas dentro del separador trifásico SE-001COL.*

*a) Contornos. b) Representación de volumen solo gas*



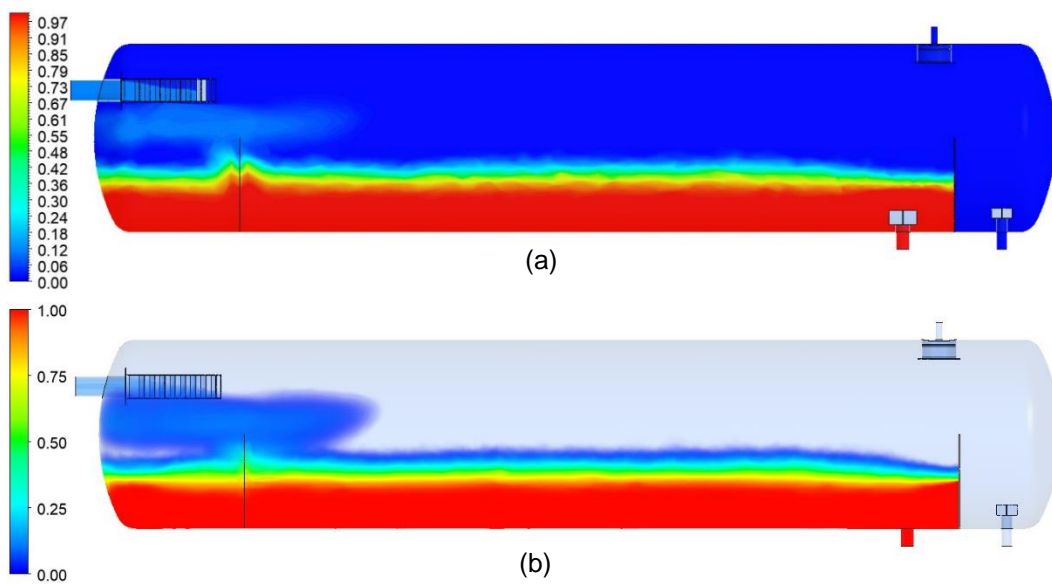
**Figura 28**

*Comparación fracción volumétrica de crudo dentro del separador trifásico SE-001COL.  
a) Contornos. b) Representación de volumen solo crudo*



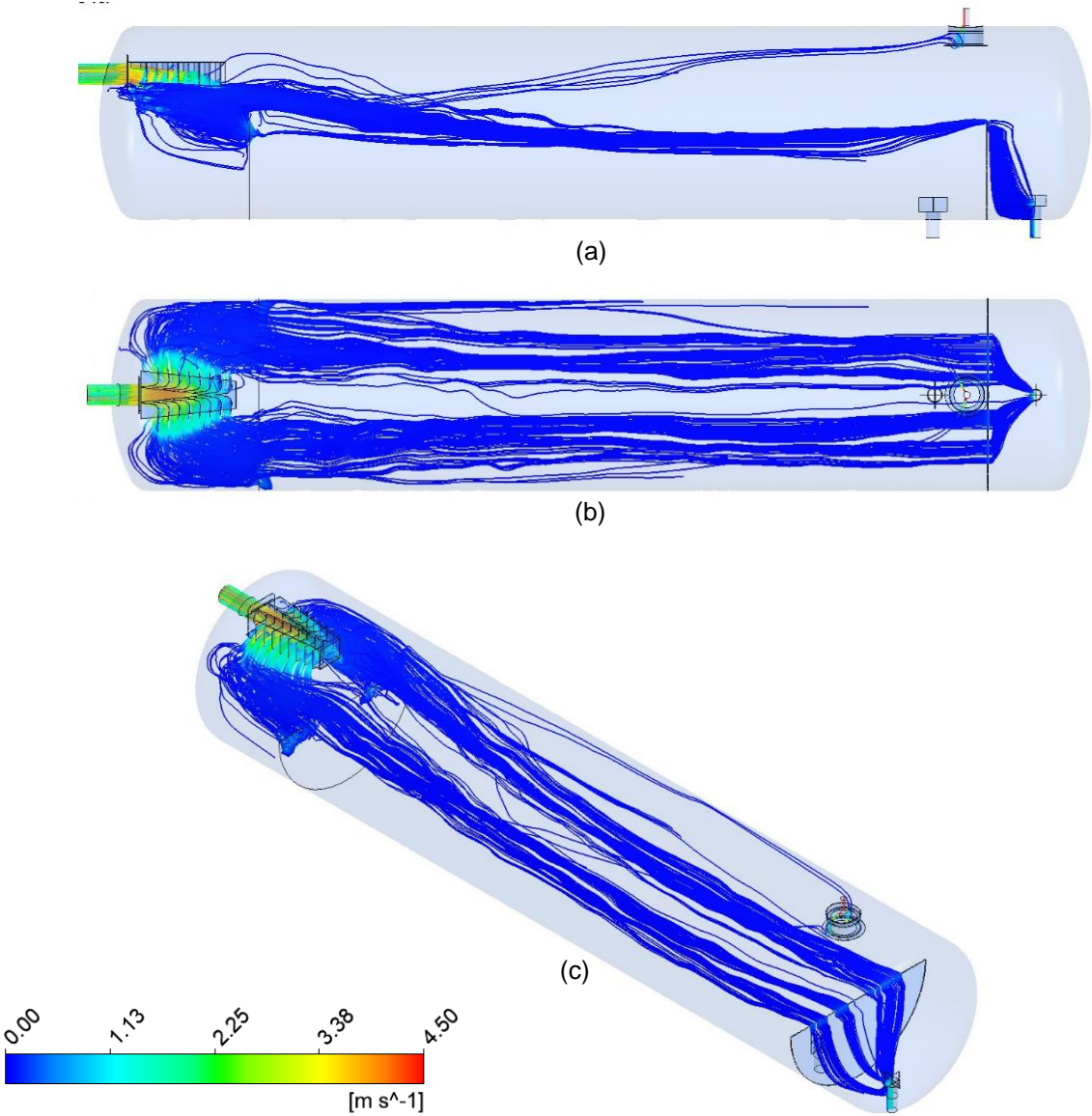
**Figura 29**

*Comparación fracción volumétrica de agua dentro del separador trifásico SE-001COL.  
a) Contornos. b) Representación de volumen solo agua*



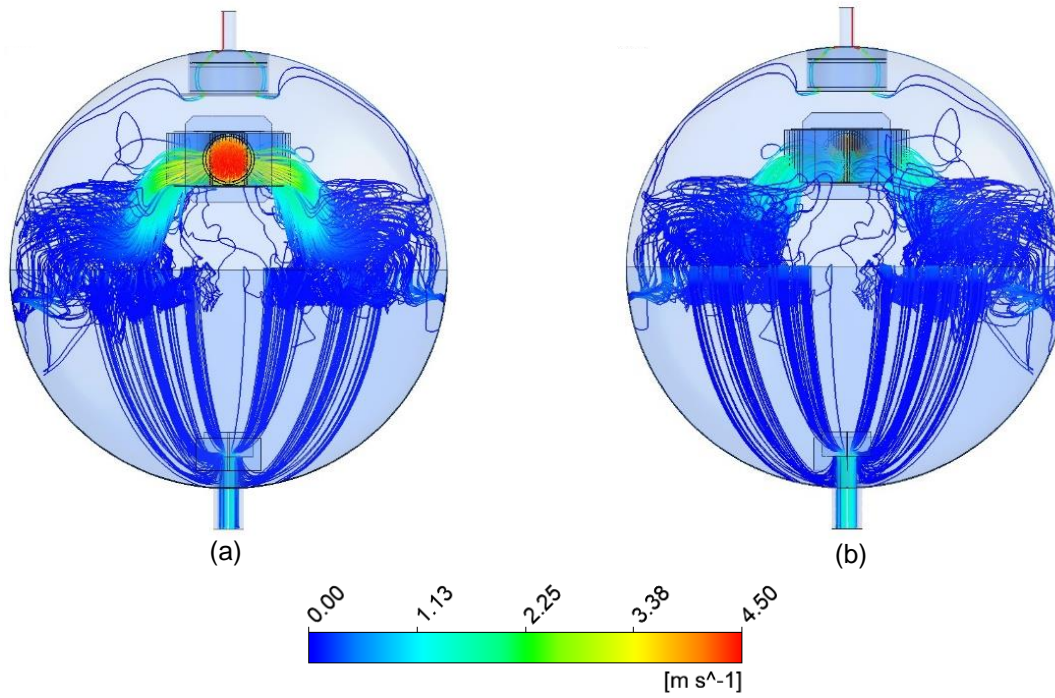
La Figura 30 y Figura 31 muestran líneas de corriente de velocidad específica en diferentes vistas de interés del separador, estos gráficos fueron generados configurando como punto de partida la alimentación al equipo, donde las líneas avanzan a lo largo del dominio hacia las salidas de gas, crudo y agua.

**Figura 30**  
*Líneas de corriente velocidad específica separador trifásico SE-001COL. Vistas: a) Lateral. b) Superior. c) Isométrica*



**Figura 31**

*Líneas de corriente velocidad específica en el separador trifásico SE-001COL. Vistas: a) Frontal. b) Posterior*

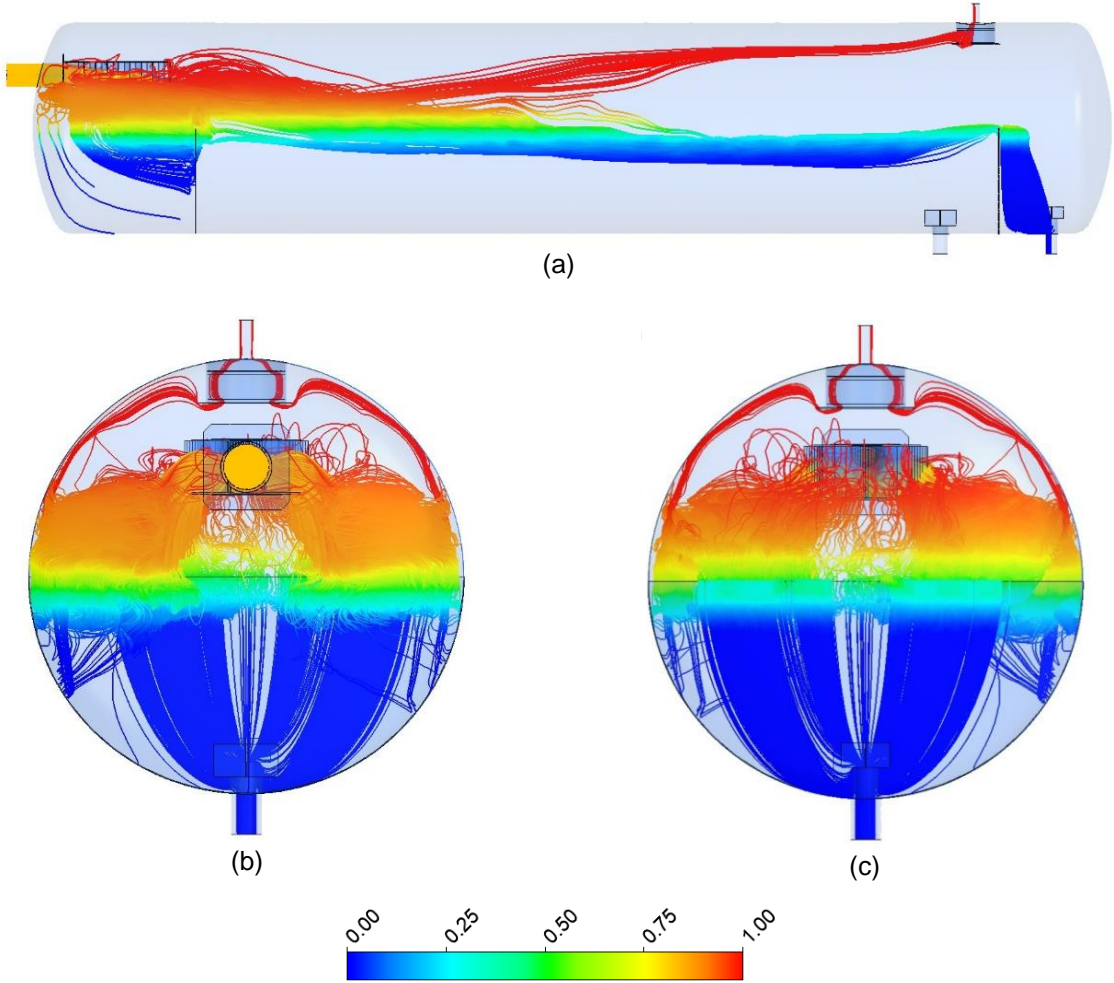


En términos generales, los resultados presentan la trayectoria principal de los fluidos, bosquejando la reducción de la velocidad del flujo multifásico (4,5 m/s) a través de la división progresiva del caudal de alimentación en el dispositivo de entrada, donde predomina corrientes descendentes en las salidas de las aletas con velocidades alrededor de 1 m/s. No obstante, como lo permite identificar las líneas de corriente con fracción volumétrica de la Figura 32, las corrientes descendentes laterales mantienen un contenido representativo de gas indicando que el dispositivo de entrada no es eficiente en la separación principal gas/líquido.

Con el propósito de discriminar el rendimiento del dispositivo de entrada la Figura 33 y Figura 34 presentan las isosuperficies de fracción volumétrica de las fases para velocidades de

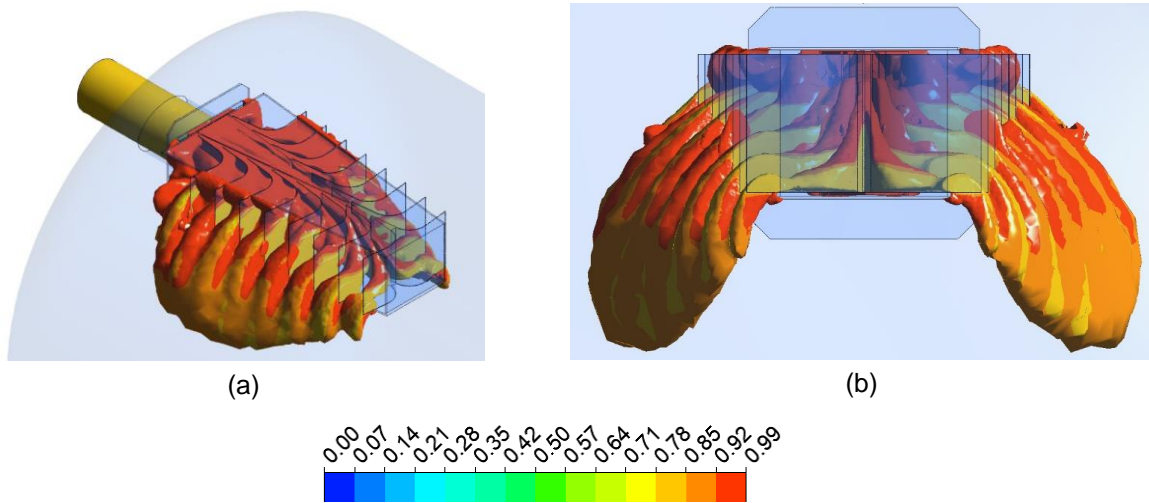
flujo de 0,8 m/s, las cuales enfatizan la presencia sustancial de gas en las corrientes que caen hacia la sección de líquido. Este hallazgo relevante sugiere que el dispositivo de entrada tipo aletas está sobredimensionado para las condiciones actuales de alimentación de flujo multifásico, lo que impacta directamente el desempeño de separación del equipo.

**Figura 32**  
*Patrón de flujo en el separador trifásico SE-001COL, líneas de corriente con fracción volumétrica de gas. Vistas: a) Lateral. b) Frontal. c) Posterior*



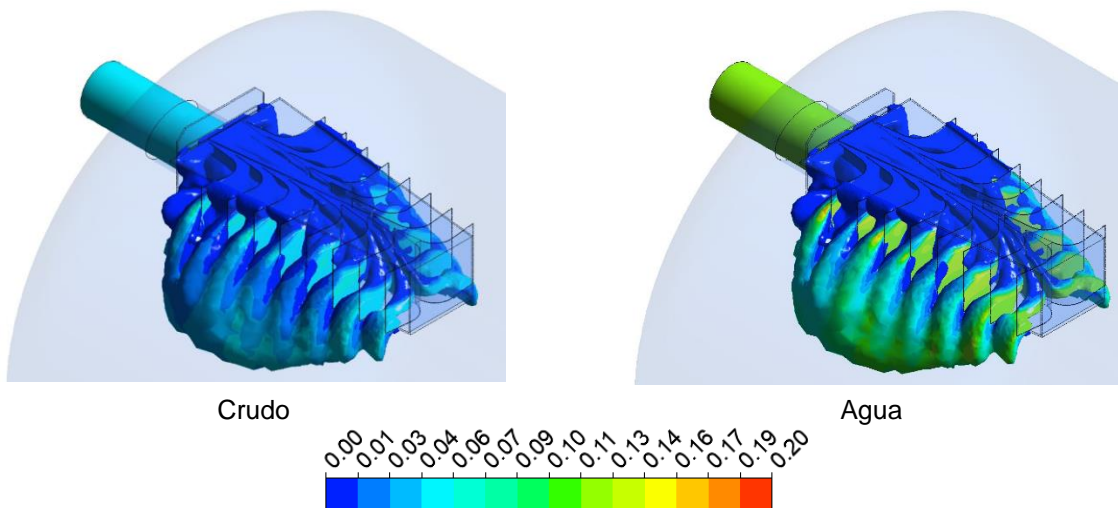
**Figura 33**

*Isosuperficies de fracción volumétrica de gas para velocidades de flujo de 0,8 m/s en dispositivo de entrada tipo aletas. Vistas: a) Isométrica. b) Posterior*



**Figura 34**

*Vista isométrica isosuperficies de fracción volumétrica para velocidades de flujo de 0,8 m/s en dispositivo de entrada tipo aletas*



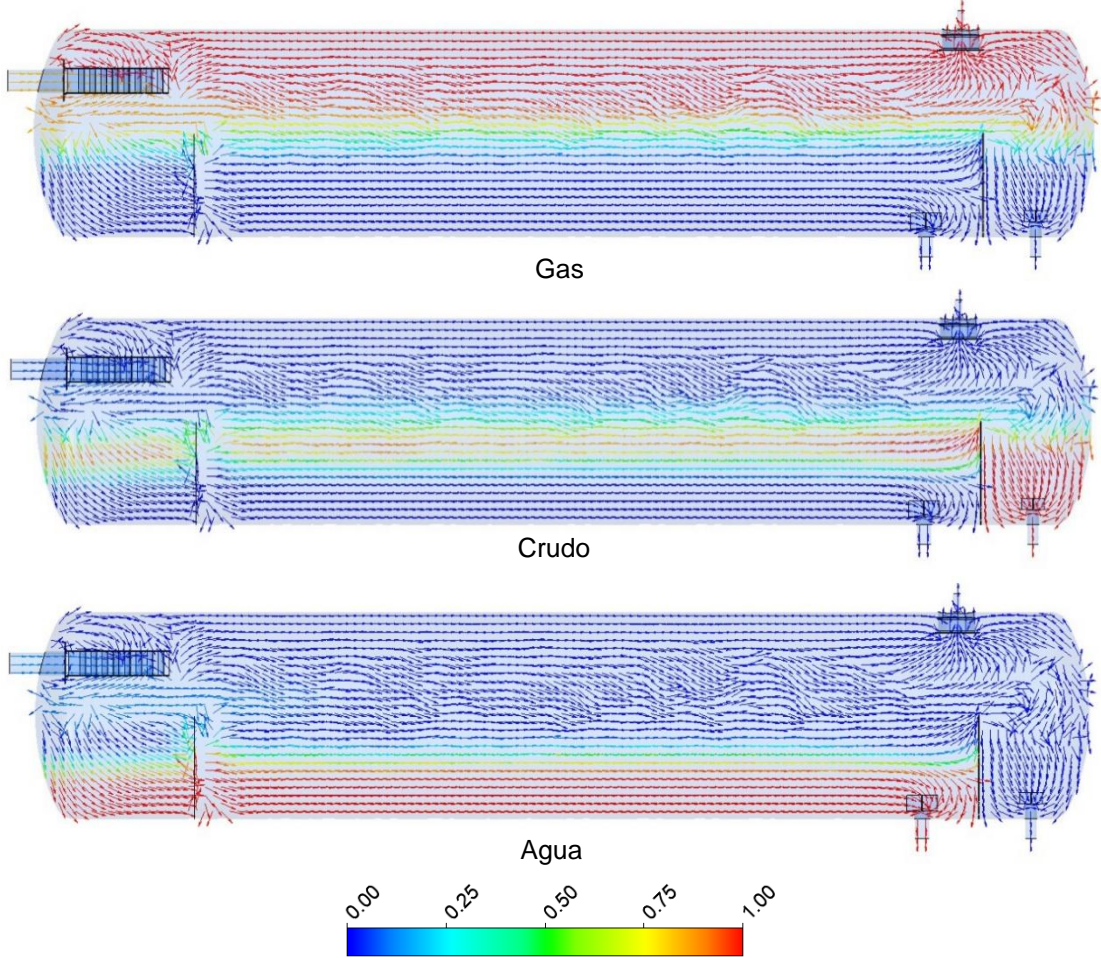
Según Bothamley, (2015) el límite superior recomendado como heurística para la selección de dispositivos de entrada tipo tubería semiabierto y tipo aleta basado en el momento de entrada

o presión dinámica es de 1.400 y 5.400 lb/ft-s<sup>2</sup>, respectivamente; considerando que la boquilla de alimentación al separador es de 12 in Sch 80, el momento de entrada calculado es de 1.983,4 lb/ft-s<sup>2</sup>, sí bien la selección del rompedor de momento es asertiva, para las condiciones de operación actuales un dispositivo de entrada con boquilla de 10 in sería más conveniente con una presión dinámica de alimentación de 3.993 lb/ft-s<sup>2</sup>. Sin embargo, es fundamental revisar las memorias de cálculo, bases de diseño, las retroalimentaciones derivadas de los talleres de revisión de diseño (*design review*) y de revisión por pares (*peer review*), así como, las recomendaciones del análisis de riesgo de proceso, para validar las consideraciones relacionadas con el dispositivo de entrada, donde inicialmente se presume que posiblemente está sobredimensionado para el manejo de escenarios de flujo tapón (*batches* de gas o líquidos asociados a comportamientos dinámicos en el sistema de recolección de los fluidos de producción).

Otro aspecto característico a ser abordado es el desempeño del dispositivo de entrada en la distribución de flujo, para tal fin, se analizaron vectores que proporcionan un medio para representar la orientación y dirección de la velocidad en puntos discretos del dominio, tal y como se muestra en la Figura 35; el patrón de flujo completamente desarrollado permite apreciar que a lo largo de la longitud efectiva del separador en la parte superior (tope) e inferior (fondo) se establece un perfil de flujo pistón, no obstante, en la parte media por encima de la interfase gas/líquido, el gas no alcanza una condición de flujo lineal, lo que ocasiona ligeras perturbaciones en la interfase por transferencia de momento lo cual no es significativo para generar re-entramiento de líquido como se presenta más adelante en el rastreo de gotas (ver Figura 42 y Figura 43).

**Figura 35**

*Vista lateral patrón de flujo en el separador, vectores de velocidad con fracción volumétrica de las fases*

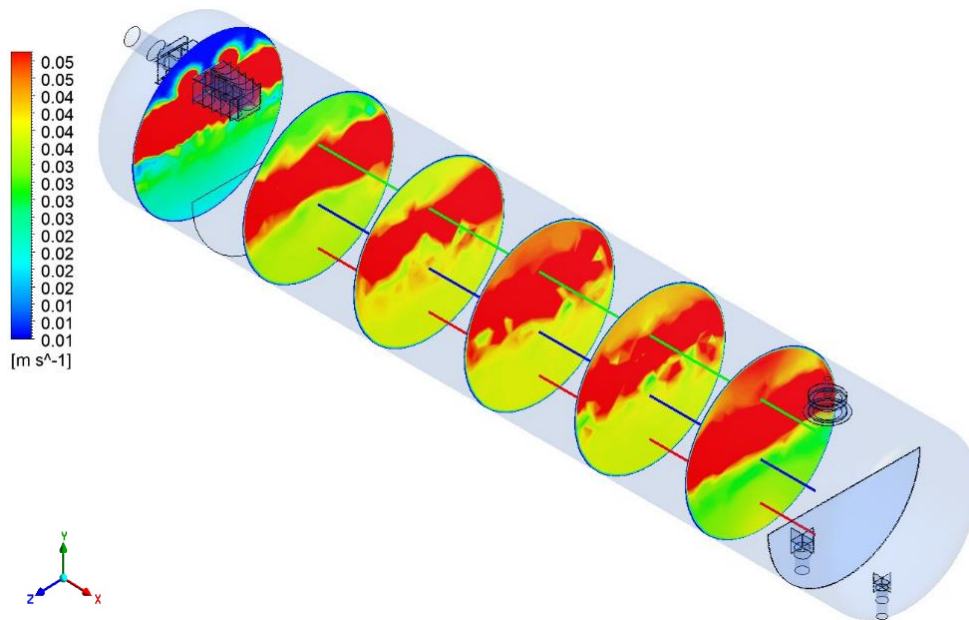


De modo complementario, la Figura 36 presenta la distribución de flujo interno por medio de contornos de velocidad en diferentes secciones transversales en el separador, a partir de las cuales se nota que el gas no alcanza una distribución uniforme dando lugar a zonas muertas y subutilizadas en el primer tercio longitudinal del equipo (alrededor de 4 m). Este resultado representa un hallazgo de interés mostrando la existencia de flujo preferencial o canalización de la fase gas en la parte adyacente por encima de la interfase, como también lo permite identificar

las líneas de corriente de la Figura 32 y los vectores de velocidad con fracción volumétrica de la Figura 35.

### Figura 36

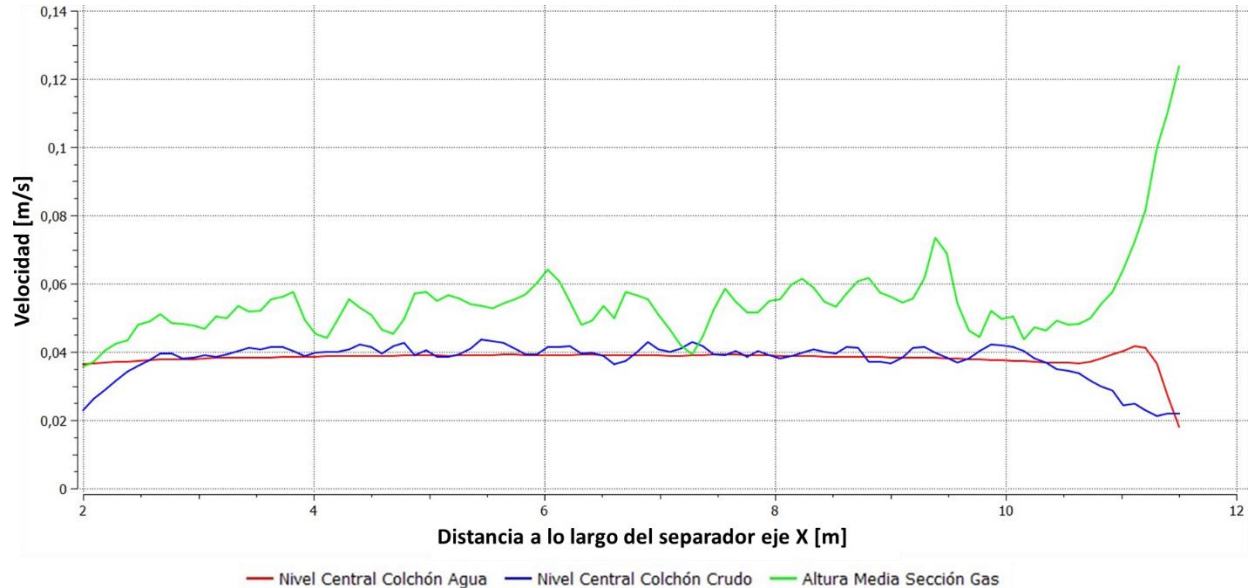
*Vista isométrica contornos de velocidad específica en múltiples secciones transversales a lo largo del separador*



Obsérvese que la Figura 37 presenta los perfiles de velocidad a lo largo de la longitud efectiva del separador en los niveles medios de las secciones ocupadas por las fases (construidos con 100 puntos de medición tomados en las líneas de trazabilidad de la Figura 36), los cuales muestran que en el colchón de agua (tendencia roja) se desarrolla un flujo pistón, mientras que en el colchón de crudo (tendencia azul) está misma condición es ligeramente perturbada por las variaciones de velocidad del flujo de gas (tendencia verde).

**Figura 37**

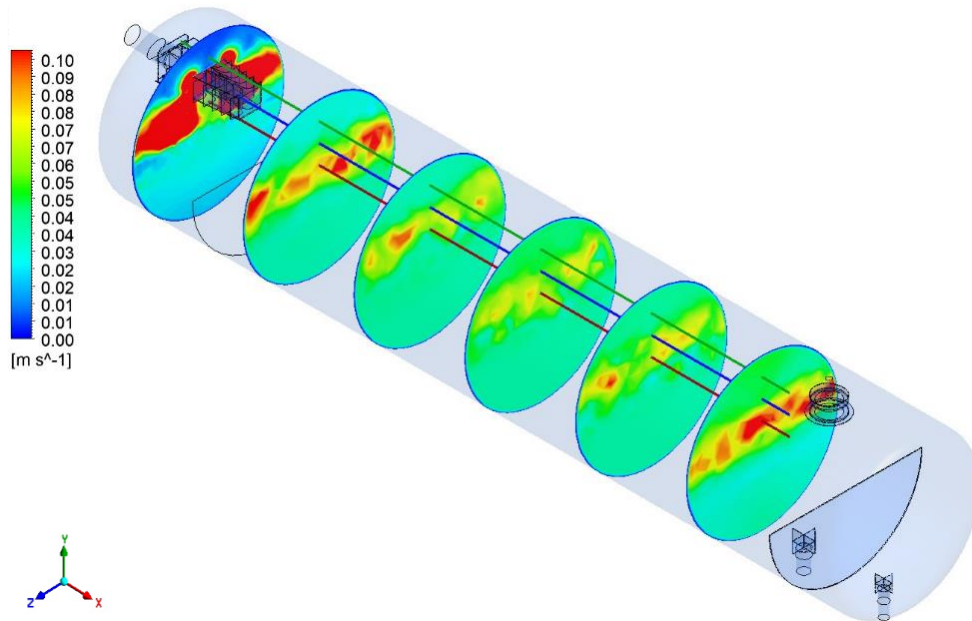
Perfil de velocidad de los fluidos a lo largo del separador SE-001COL trazabilidad en los niveles centrales de las secciones ocupadas por las fases



Dadas las variaciones de velocidad en la altura media de la sesión de gas, con el propósito de diferenciar el comportamiento del flujo se definieron dos líneas de trazabilidad adicionales con extensión hacia el dispositivo de entrada (ver Figura 38), para construir los perfiles de velocidad a lo largo del separador a diferentes alturas, tal y como se ilustra en la Figura 39. De esta manera, al comparar las tendencias de velocidad en las diferentes alturas de seguimiento se muestra cuantitativamente que mayormente en el primer tercio del equipo no se logra una apropiada distribución de gas debido al rendimiento primario de separación en el dispositivo de entrada. Detállese la diferencia cualitativa de los campos de velocidad en la sección de entrada alrededor del *multi vane* (ver Figura 38), donde el contraste del espaciamiento entre los perfiles de velocidad de las tendencias verde y roja de la Figura 39, revelan una baja calidad en la distribución del flujo de gas inmediatamente y aguas abajo del dispositivo de entrada.

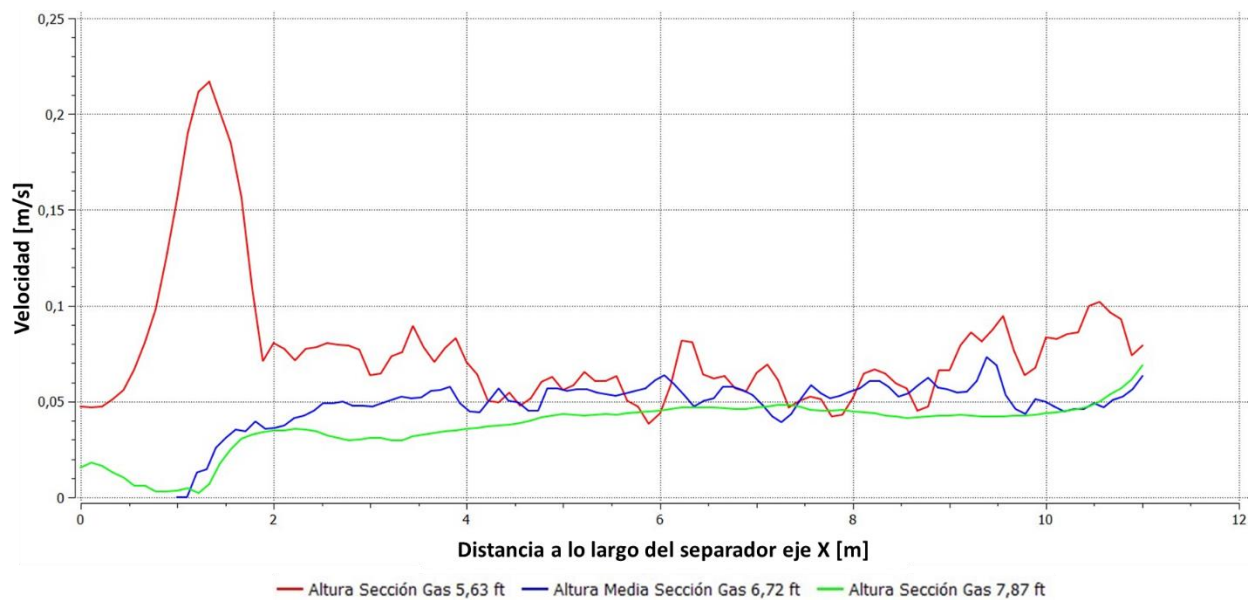
**Figura 38**

Vista isométrica contornos de velocidad específica en múltiples secciones transversales a lo largo del separador énfasis perfil de flujo desarrollado fase gas



**Figura 39**

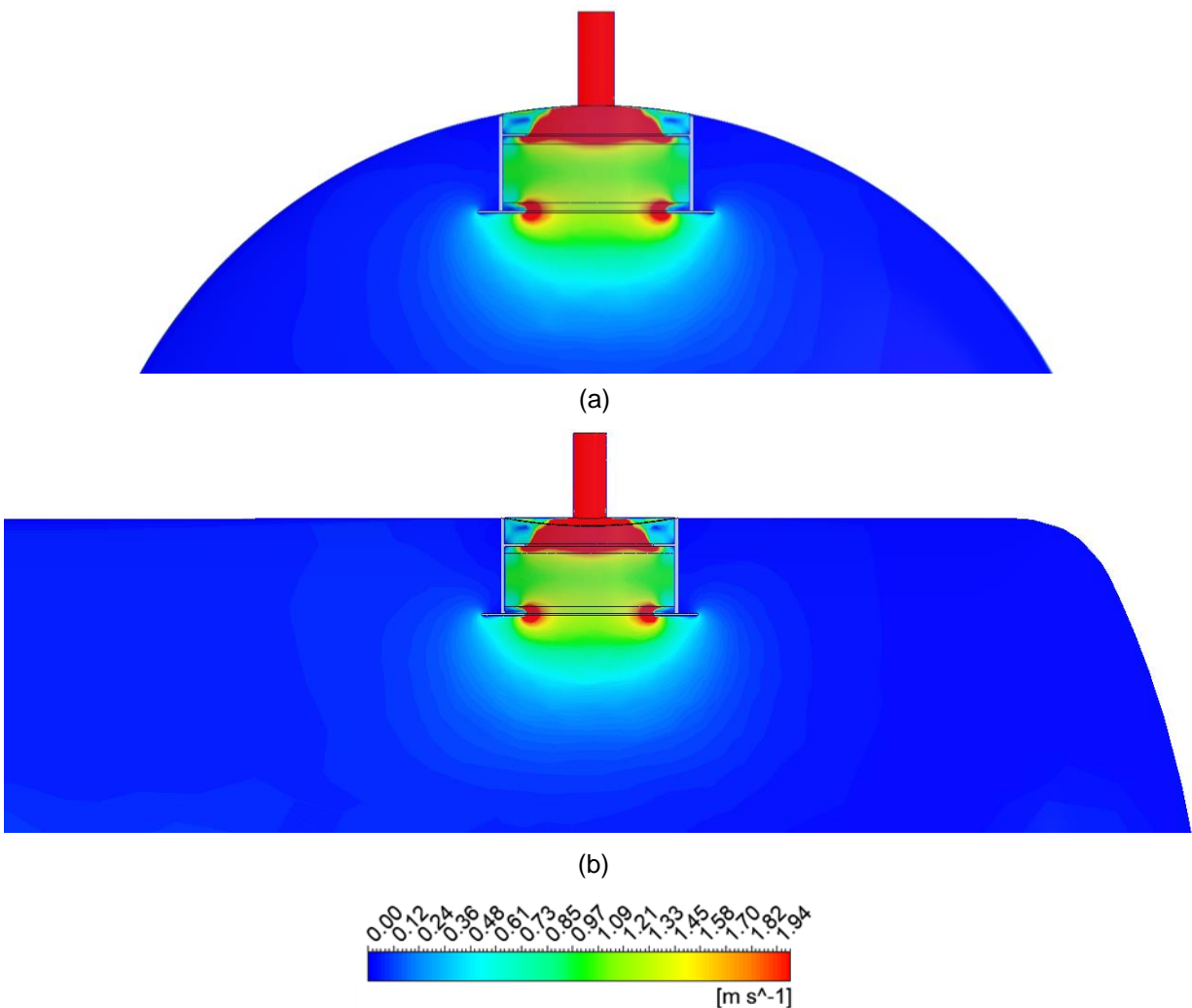
Perfil de velocidad desarrollado por el gas a lo largo del separador SE-001COL trazabilidad a diferentes alturas de la sección ocupada por el gas



Por otra parte, la Figura 40 presenta en dos vistas de interés los campos de velocidad del gas en el eliminador de niebla tipo malla de alambre el cual tiene un arreglo de instalación horizontal con flujo vertical, los resultados muestran que a través del *demister* no se desarrolla un perfil de velocidad uniforme donde claramente se evidencia un flujo preferencial en la parte media como consecuencia del posicionamiento demasiado cerca de la almohadilla con la boquilla de salida.

**Figura 40**

*Contornos de velocidad específica en eliminador de niebla tipo malla de alambre.  
a) Vista posterior en plano YZ. b) Vista lateral en plano XY*

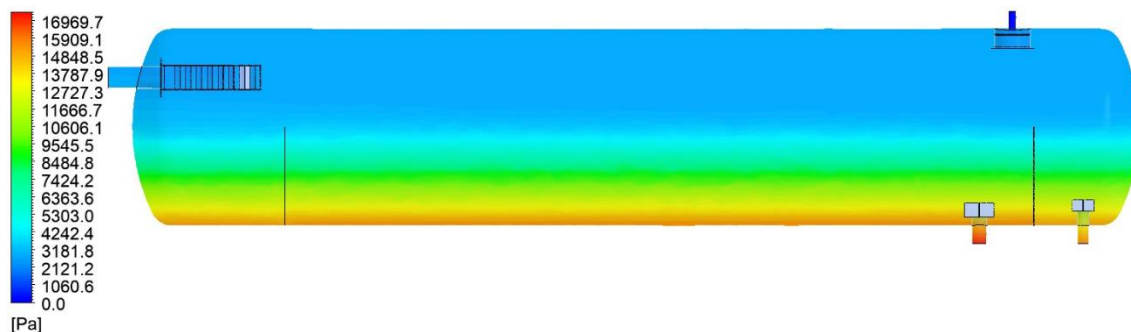


De acuerdo con los criterios de diseño sugeridos por Arnold & Stewart, (2008), se calcula que el espaciamiento mínimo requerido entre la boquilla y el elemento debe ser de aproximadamente 196 mm (7,72 in), distancia que no se cumple en el arreglo actual del separador con un valor de 100 mm (3,94 in). Este escenario operativo puede derivar en una degradación del desempeño en la reducción de la carga de niebla de la corriente de gas, ya que las gotas retenidas en el elemento son rearrastradas en las zonas con mayores velocidades (parte central) y presentar bajas eficiencias de impacto inercial en las zonas con menores velocidades (partes externas) dejando pasar gotas de líquido.

En la Figura 41 se presenta los contornos de presión en el separador trifásico, los resultados de la simulación CFD predicen una caída de presión de 2858,6 Pa (0,415 psi) para la fase gas, lo cual concuerda con la realidad en campo donde el monitoreo de presión a la salida de gas registra valores alrededor de los 59 psig.

**Figura 41**

*Vista lateral contornos de presión en el separador SE-001COL en plano XY*



La baja caída de presión está directamente asociada con la baja pérdida de carga en el dispositivo de entrada (sobredimensionado), ya que la caída de presión a través del eliminador de

niebla tipo malla de alambre por lo general es controlada en el rango de 250 a 500 Pa. Obsérvese el gradiente de presión en la sección ocupada por el crudo y agua debido a la columna de líquidos, lo cual refleja la realidad física del sistema de estudio y la configuración apropiada del modelo CFD.

Cabe destacar que para complementar el estudio de las características de flujo a través del separador primario de producción SE-001COL, adicionalmente se llevó a cabo un análisis preliminar DPM para predecir el comportamiento de las fases dispersas crudo, agua y arenas a través del equipo. En la Tabla 15 se listan los parámetros del modelo de distribución de tamaño de partícula de Rosin-Rammler empleados para realizar el rastreo de las trayectorias de las fases secundarias a lo largo del dominio computacional; sin embargo, se deja constancia que en ausencia de información de laboratorio se utilizaron distribuciones reportadas en la literatura, como primera aproximación para las inyecciones de las fases discretas (Pourahmadi Laleh, 2010).

**Tabla 15**

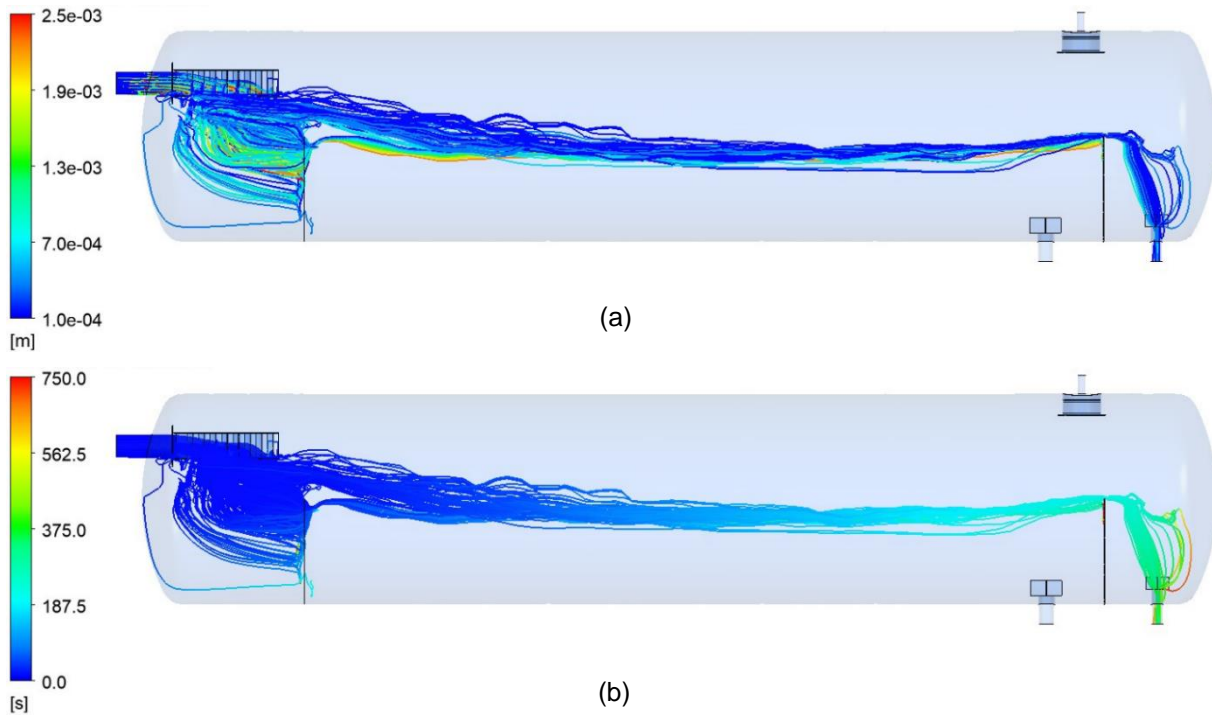
*Parámetros análisis preliminar DPM para rastreo de fases discretas*

<b>Parámetros Modelo de distribución de tamaño de partícula de Rosin-Rammler</b>			
<b>Fase secundaria</b>	<b>Gotas de crudo</b>	<b>Gotas de agua</b>	<b>Partículas de arena</b>
Diámetro mínimo [ $\mu\text{m}$ ]	100	100	20
Diámetro máximo [ $\mu\text{m}$ ]	2500	4000	1000
Diámetro medio [ $\mu\text{m}$ ]	1000	1600	400
Parámetro de dispersión		2,6	

La Figura 42 y Figura 43 presentan las trayectorias de las fases dispersas crudo y agua, respectivamente, donde fácilmente se puede observar el arrastre de carga de líquidos entrando a la sección de separación gravitacional de gas con tamaños de gotas mayores a 100 micrones.

**Figura 42**

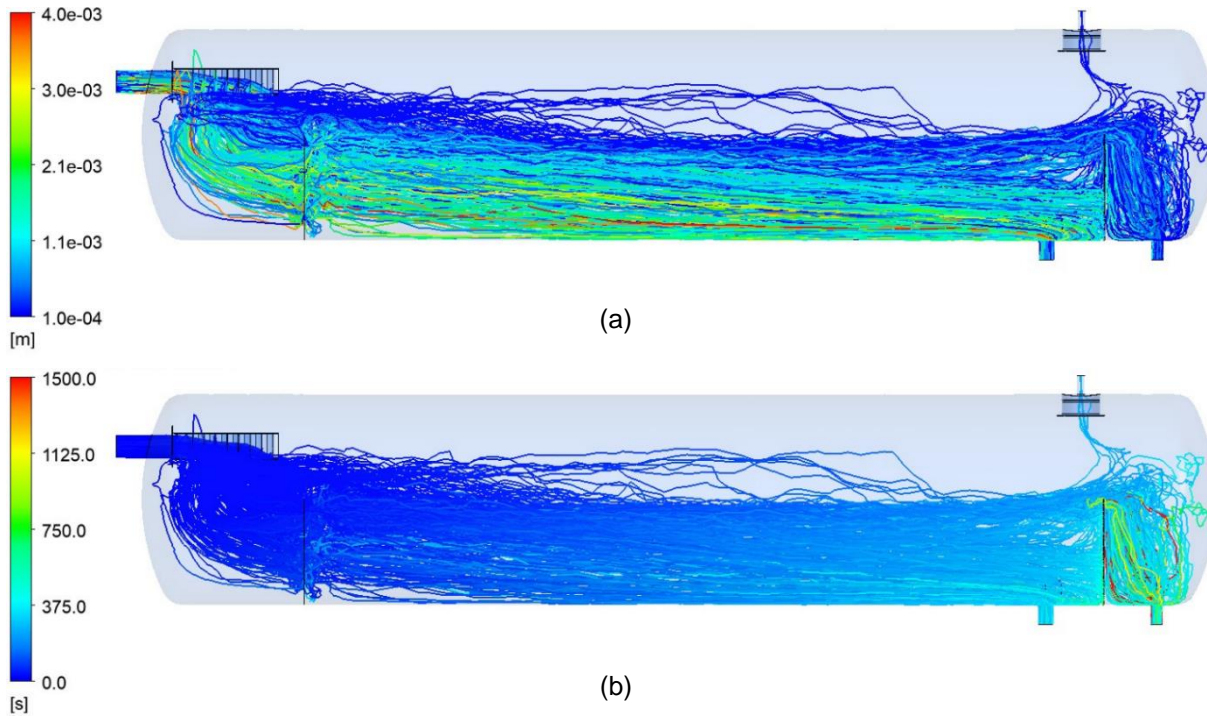
Rastreo gotas de crudo. a) Diámetro de las gotas. b) Tiempo de residencia



Un resultado relevante es que la baja calidad en la distribución de flujo y la canalización del gas, dan lugar a que gotas de agua alrededor de los 100 micrones no logran completamente el asentamiento hacia la interfase gas/líquido, tal y como se puede visualizar en la Figura 43(a). Lo anterior evidencia el arrastre de solo una fracción de gotas de agua (no gotas de crudo ver Figura 42) hacia el eliminador de niebla, debido a la mayor tensión superficial de la interacción gas/agua (63,96 dina/cm) respecto a la interacción gas/crudo (31,18 dina/cm).

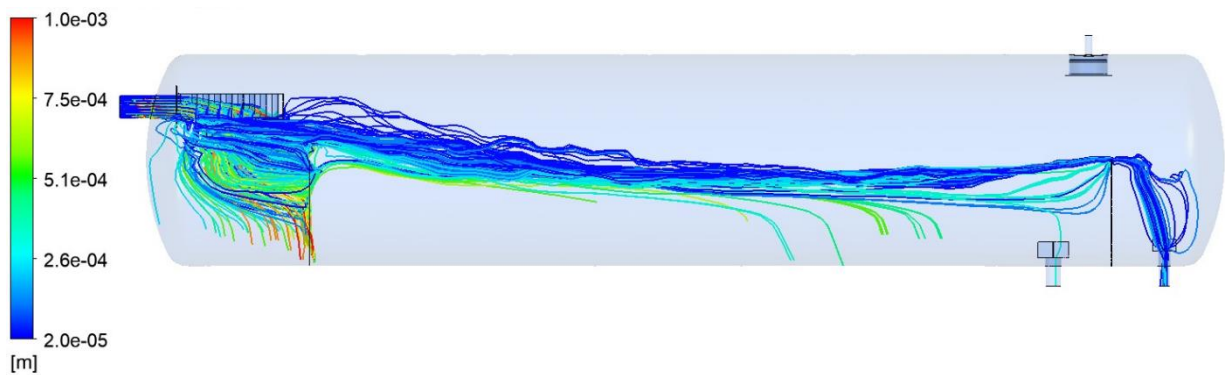
**Figura 43**

*Rastreo gotas de agua. a) Diámetro de las gotas. b) Tiempo de residencia*



**Figura 44**

*Rastreo partículas sólidas tendencia de asentamiento diámetros de arenas*



Por otro lado, en la Figura 44 se observa la tendencia de asentamiento de arenas la cual indica que en la sección de entrada se genere la mayor acumulación de sólidos (como era de

esperarse), lo cual es manejado por el sistema *sand jet and drain*; sin embargo, como lo muestra la Figura 20(a) el baffle perforado no cuenta con una ranura inferior para la migración de sólidos, lo cual puede generar acumulaciones (puntos de corrosión localizada bajo depósitos) si los chorros de las boquillas de aspersión de agua no alcanzan estas zonas muertas.

Finalmente, la Tabla 16 resume los resultados de las estadísticas preliminares de los tiempos de residencia donde se obtuvo valores promedio de 6,3 minutos para el crudo pesado y 9,3 minutos para el agua (ver histogramas de la Figura 45), al considerar tiempos de residencia teóricos de 10 minutos (como lo reportan en las memorias de cálculo de acuerdo con las recomendaciones de la norma API 12J), se estima preliminarmente que los porcentajes de utilización del separador son del 63,3% para la fase crudo y 93,3% para la fase agua. Lo anterior quiere decir, existen márgenes de mejora para tener un mayor aprovechamiento del equipo, donde es necesario adelantar estudios de optimización con el propósito de promover los fenómenos de coalescencia de las gotas de crudo al incrementar el tiempo de residencia efectivo.

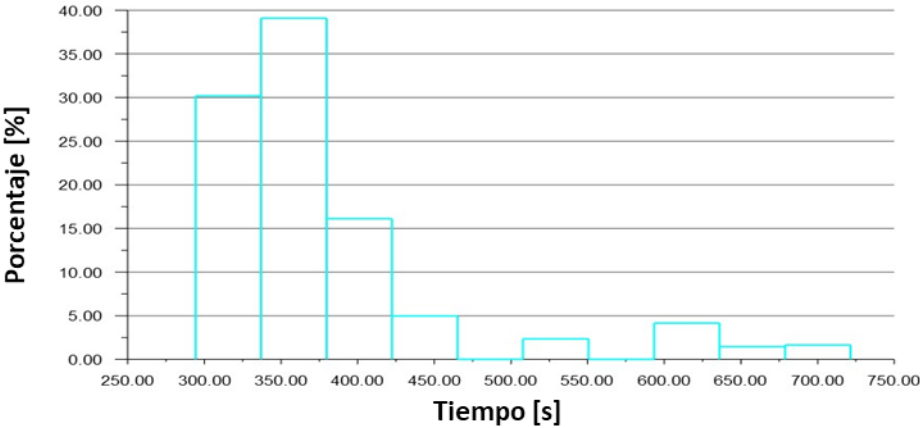
**Tabla 16**

*Resultados preliminares estadísticas rastreo de gotas tiempos de residencia*

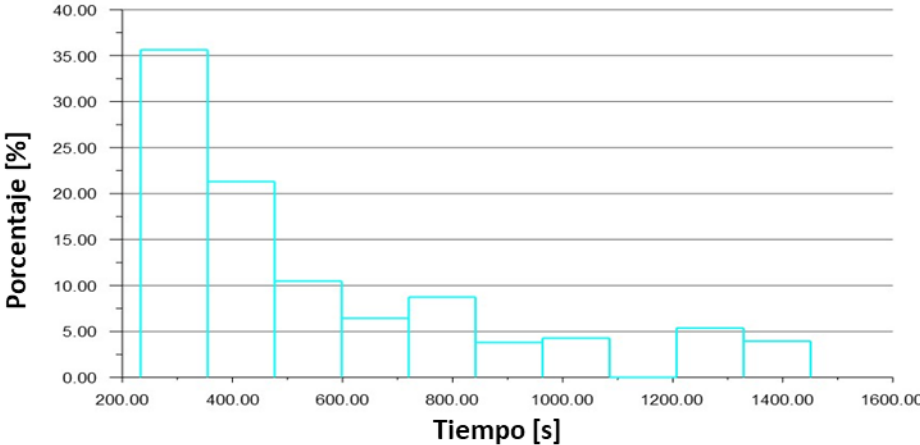
Estadísticas análisis DPM rastreo de fases discretas								
Tiempo de retención	Gotas de crudo				Gotas de agua			
Número total de partículas	950				950			
Promedio	379,8	s	<b>6,3</b>	min	559,9	s	<b>9,3</b>	min
Mínimo	294,2	s	4,9	min	233,4	s	3,9	min
Máximo	721,5	s	12,0	min	1450,3	s	24,2	min
Sum	1,67E+07				3,95E+07			
Desviación estándar	85,2				319,8			
Tiempo de residencia teórico	600	s	10	min	600	s	10	min
Porcentaje de utilización del equipo	<b>63,3</b>				<b>93,3</b>			
			%				%	

**Figura 45**

*Histogramas preliminares tiempos de residencia. a) Crudo. b) Agua*



(a)



(b)

#### 4. Conclusiones

Cabe destacar la construcción rigurosa del modelo CAD 3D a escala completa del separador trifásico SE-001COL actualmente en servicio en una facilidad colombiana con base en la información disponible de planos de dimensiones generales, planos de detalle de internos y modelo CAD mecánico suministrado por el campo, a partir del cual las dimensiones del recipiente horizontal de 9 ft (108 in o 2,74 m) de diámetro y 42,5 ft (510 in o 12,95 m) de longitud costura a costura, y los aspectos geométricos más relevantes de: el dispositivo de entrada tipo aletas con 16 paletas curvadas, el baffle perforado de tranquilización y distribución de flujo con patrón de perforación cuadrado con 252 orificios de 2 in con espaciamiento entre centros (*hole pitch*) de 100 mm (equivalente a una área activa o libre del 17,28%), el eliminador de niebla tipo malla de alambre de 6 in de espesor con almohadilla instalada horizontalmente en una carcasa cilíndrica (*housing*), la placa de rebose con espesor de ½ in y los rompedores de vórtice tipo cruz con espesor de 6 mm, se consideraron detalladamente como modelo limpio para capturar el efecto de los componentes internos en la fluidodinámica del separador primario.

Es importante señalar la creación de una malla computacional poliédrica con 5.137.250 volúmenes de control y 19.097.296 nodos en el interior para la discretización del dominio fluido del separador, las estadísticas de calidad de las celdas con valores de: máxima oblicuidad de 0,54, mínima calidad ortogonal de 0,46 y máxima relación de aspecto de 44,76, califican cualitativamente la generación de una malla tridimensional de buena calidad con métricas por encima de los valores aceptables. Así mismo se resalta que, para la generación de la malla del separador trifásico, se emplearon herramientas avanzadas de discretización que reducen la

densidad de malla, ya que, en contraste con métodos convencionales el número de volúmenes de control puede incrementarse sustancialmente.

La configuración del modelo CFD 3D del separador trifásico SE-001COL abordando un enfoque de modelamiento Euleriano-Lagrangiano (VOF-DPM), aproxima de forma representativa las características de flujo multifásico dada la distribución de las fases gas, crudo pesado y agua (Figura 26 a Figura 29) y la predicción de la caída de presión de 2858,6 Pa (0,415 psi) para la fase gas (lo cual concuerda con la realidad en campo donde el monitoreo de presión a la salida de gas registra valores alrededor de los 59 psig). Es necesario resaltar el modelamiento conservativo simplificado del bafle perforado de tranquilización y el eliminador de niebla tipo malla de alambre por medio del modelo de medio poroso para reducir la densidad de malla y la demanda de recurso computacional. Para tal fin, los parámetros del modelo *porous jump* del bafle perforado se determinaron por medio de análisis paramétrico con simulaciones CFD simplificadas para caracterizar la caída de presión en función de la velocidad superficial de la corriente libre, abarcando un rango de flujo aproximado de 8 a 29 KBFPD con pérdidas de carga entre 3,21 a 20,94 Pa, respectivamente (Tabla 11); así, los datos experimentales numéricos fueron ajustados en términos de una ecuación de tipo Hazen-Dupuit-Darcy con un coeficiente de correlación ( $R^2$ ) de 1, a partir de la cual se estimó el coeficiente *pressure jump* ( $C_2$ ) y la permeabilidad de la cara del medio ( $\alpha$ ). De manera similar, los coeficientes o factores de resistencia inercial ( $C_2$ ) y viscosa ( $1/\alpha$ ) del modelo de medio poroso para el eliminador de niebla, fueron estimados con base en la correlación empírica proporcionada por el fabricante en la hoja de datos para malla tejida en alambre de metal con diámetro de hebra de 0,19 mm, área superficial específica de 484 m<sup>2</sup>/m<sup>3</sup> y porosidad del 97,65%; donde se abarcó una ventana operativa para la retención de gotas de líquido

por impacto o choque inercial con velocidades del gas entre 0,64 a 3,2 m/s y caídas de presión de 40 a 999,8 Pa, respectivamente (Tabla 13). Los datos calculados también fueron ajustados a una ecuación de tipo Hazen-Dupuit-Darcy con un coeficiente de correlación ( $R^2$ ) de 1.

Es necesario resaltar que para asegurar el desarrollo de un perfil de flujo completamente desarrollado y garantizar que los resultados obtenidos por medio de análisis CFD sean confiables representando apropiadamente los fenómenos físicos involucrados dada la complejidad del separador trifásico, se manejaron los siguientes criterios de aceptación de acuerdo con los lineamientos de buenas prácticas en CFD: convergencia de los valores residuales de las ecuaciones conservativas o de transporte por debajo de  $1 \times 10^{-3}$ , cierre de balance de masa con restricción por debajo del 1% y estabilidad física del sistema por medio de la trazabilidad de la caída de presión del gas en el separador.

Los resultados de la simulación CFD del separador SE-001COL a las condiciones de operación y con las propiedades de los fluidos (determinadas con base en los reportes de laboratorio suministrados por el campo), revelan los siguientes hallazgos de especial interés relacionados con las fuentes que afectan directamente la eficiencia global de separación de las fases, a continuación, se listan los principales aspectos identificados en esta etapa de diagnóstico:

1. Es importante señalar que el dispositivo de entrada tipo aletas (*multi vane*) está sobredimensionado para las condiciones actuales de flujo multifásico, ya que, para la boquilla de alimentación de 12 in Sch 80 el momento de entrada o presión dinámica calculado es de 1.983,4 lb/ft-s<sup>2</sup>, valor muy por debajo del límite superior recomendado

(5.400 lb/ft-s<sup>2</sup>) por Bothamley, (2015) como heurística para la selección de dispositivos tipo aletas. Lo anterior impacta la separación primaria gas/líquido en el dispositivo de entrada como lo permite identificar los contornos de fracción volumétrica, representación de volumen de las fases, líneas de corriente e isosuperficies (Figura 27 a Figura 34), lo cual afecta la calidad de la distribución de flujo dando lugar a canalización del gas por la sección ligeramente por encima de la interfase gas/crudo, lo que genera zonas muertas o subutilizadas en el primer tercio longitudinal del equipo (alrededor de 13,12 ft o 4 m) como lo muestra detalladamente el patrón de flujo interno y los perfiles de velocidad de las fases (Figura 35 a Figura 39).

2. Con respecto al eliminador de niebla tipo malla de alambre montado horizontalmente en la carcasa cilíndrica se debe precisar que, los resultados de los campos de velocidad del gas muestran que no se desarrolla una distribución uniforme de flujo vertical (Figura 40), debido a la instalación próxima de la almohadilla respecto a la boquilla de salida de gas, donde de acuerdo con los criterios de diseño sugeridos por Arnold & Stewart, (2008), se estimó que el espaciamiento mínimo recomendado entre la boquilla y el elemento debe ser de aproximadamente 196 mm (7,72 in), distancia que no se cumple en el arreglo actual del separador con un valor de 100 mm (3,94 in). Por tal razón, este escenario operativo puede degradar el desempeño en la reducción de la carga de niebla de la corriente de gas, ya que las gotas retenidas en la malla de alambre son rearrastradas en las zonas con mayores velocidades (parte central) y presentar bajas eficiencias de impacto inercial en las zonas con menores velocidades (partes externas) dejando pasar gotas de líquido.

3. Con base en la comparación en paralelo de la distribución de las fases gas, crudo pesado y agua dentro del separador trifásico para la condición inicial de las interfases con relación a la condición final en estado estacionario (Figura 26), se pudo evidenciar que en la región cercana a la placa de rebose la interfase crudo/agua es ligeramente arrastrada por la salida de agua, donde las direcciones de los vectores de velocidad con fracción volumétrica (Figura 35) muestran que esta condición particular no genera una perturbación o desviación significativa a la operación siempre y cuando la velocidad de salida del agua no se incremente sustancialmente.
  
4. Cabe resaltar que adicionalmente a los objetivos propuestos en el marco de este trabajo, se realizó un análisis DPM preliminar para determinar el comportamiento de las fases secundarias o dispersas con el propósito de complementar el estudio de las características de flujo en el separador trifásico, donde en ausencia de información de laboratorio, distribuciones de tamaño de partícula del modelo de Rosin-Rammler reportadas en la literatura fueron empleadas como referencia de primera aproximación para el rastreo de las fases discretas (Tabla 15). Los resultados de las estadísticas del rastreo de partículas a través del dominio computacional presentadas en la Tabla 16 y en los histogramas de la Figura 45, predicen tiempos de residencia efectivos promedio de 6,3 minutos para la fase crudo y 9,3 minutos para la fase agua, lo cual es equivalente a porcentajes de utilización del separador de 63,3% y 93,3%, respectivamente. Lo anterior indica que existen oportunidades potenciales de mejora para tener un mayor aprovechamiento del equipo, lo cual puede ser llevado a cabo en la etapa de

optimización o *troubleshooting* con el objetivo de incrementar el tiempo de residencia efectivo de las fases para promover los fenómenos de coalescencia de las gotas dispersas.

5. De acuerdo con las predicciones preliminares del rastreo de partículas sólidas donde se muestran las tendencias de asentamiento de arenas en el separador trifásico (Figura 44), y considerando adicionalmente que el baffle perforado de tranquilización y distribución de flujo no tiene un corte o ranura inferior para la migración de sólidos (Figura 20), se presume que posibles acumulaciones en el fondo del baffle pueden dar lugar a puntos de corrosión localizada bajo depósito si los chorros de las boquillas de aspersion de agua del sistema *sand jet and drain* no generan el barrido apropiado para remover las arenas asentadas.

## 5. Recomendaciones

Para futuros trabajos relacionados con modelamiento en CFD de separadores multifásicos, se recomienda crear superficies planas a nivel de las interfases y utilizar refinamiento localizado con técnicas de discretización de malla con especificación de tamaño de elemento para mejorar la nitidez y reducir la difusión numérica en estas regiones.

Es imperativo realizar un análisis DPM completo preferiblemente con resultados de la analítica de distribución de tamaño de partícula con mediciones representativas de campo, de lo contrario, se puede utilizar correlaciones empíricas para determinar el tamaño máximo de gota estable y el diámetro medio, con el fin de mejorar la estimación de los parámetros del modelo de distribución de tamaño de partícula de Rosin-Rammler para la dispersión de las fases secundarias entrando al separador; lo anterior permitirá aproximar con mayor precisión las predicciones del comportamiento de las fases discretas y los tiempos de residencia efectivos para el crudo y el agua. No sobra mencionar que, los porcentajes de utilización del equipo deberán ser recalculados para ser tenidos en cuenta como parámetros de referencia para los estudios de optimización del separador.

De acuerdo con los resultados de la etapa de diagnóstico del separador trifásico SE-001COL empleando análisis CFD, se recomienda tener en cuenta los siguientes planteamientos para abordar el estudio de optimización o mejora del equipo para promover el desempeño de separación de las fases:

- Es pertinente revisar detalladamente las memorias de cálculo, bases de diseño, las retroalimentaciones derivadas de los talleres de *design review* y *peer review* (sí aplica), así como, las recomendaciones del análisis de riesgo de proceso, para validar las consideraciones relacionadas con el dispositivo de entrada tipo aleta (*multi vane*), lo anterior con el propósito de validar sí se puede abordar alguna propuesta de redimensionamiento. Además, se debe considerar la reubicación del dispositivo de entrada tipo aletas (*multi vane*) con un arreglo de instalación típico invertido con entrada superior, para mejorar el aprovechamiento de la sección de entrada y eliminar o reducir zonas muertas o subutilizadas.
- Asimismo, se debe considerar que de acuerdo con Bothamley, (2015), el límite superior recomendado como heurística para la selección de dispositivos de entrada tipo tubería semiabierta y tipo aleta basado en el momento de entrada o presión dinámica es de 1.400 y 5.400 lb/ft-s<sup>2</sup>, respectivamente; por ende, al considerar la boquilla de alimentación de 12 in Sch 80 al separador el momento de entrada calculado es de 1.983,4 lb/ft-s<sup>2</sup>, sí bien la selección del rompedor de momento es asertiva, para las condiciones de operación actuales un dispositivo de entrada con boquilla de 10 in sería más conveniente con una presión dinámica de alimentación de 3.993 lb/ft-s<sup>2</sup>.
- Con base en la caracterización del perfil de caída de presión en función de la velocidad de flujo a través del patrón de perforación cuadrado del baffle de tranquilización, es necesario comentar que la restricción al paso de los fluidos debe ser incrementada para que en condiciones normales de operación las pérdidas de carga estén alrededor de 0,5 inH<sub>2</sub>O (0,018 psi). Lo anterior corresponde a datos de diseño obtenidos en trabajos pasados, por lo que se recomienda abordar

la reducción del área activa o libre desde el 17,28% a un 5 o 10%, implementando un patrón de perforación triangular para promover una mejor distribución de flujo; además de considerar una ranura o corte inferior para la migración de sólidos hacia el fondo de la sección gravitacional de líquidos donde serán barridos por el *sistema sand jet and drain*. Por lo tanto, se recomienda rediseñar el bafle perforado y caracterizar separadamente por simulaciones CFD simplificadas el perfil de pérdida de carga para derivar los respectivos parámetros del modelo de *porous jump*.

- Con el objetivo de mejorar el desarrollo de perfiles de flujo lineales tipo pistón en la sección de separación gravitacional de líquidos, se sugiere como práctica recomendada instalar un bafle perforado aguas arriba de la boquilla de salida de agua. Así mismo, se debe revisar la proyección interna de la boquilla de salida de agua y rompedor de vórtice (*vortex breaker*) para mitigar posibles perturbaciones de la interfase crudo/agua, o en un mejor escenario evaluar el reemplazo del *vortex breaker* por un sistema de colección de agua ranurado.
- Es fundamental la reinstalación de la almohadilla del eliminador de niebla considerando las recomendaciones de espaciamiento mínimo requerido respecto a la boquilla de salida de gas. Lo anterior implica necesariamente el ajuste mecánico de la carcasa (*housing*), por tal motivo, también se propone evaluar la viabilidad de implementar un arreglo de instalación vertical del *demister* con flujo horizontal del gas (con caja de salida y drenaje de líquido retenido mediante *downcomer* con sello hidráulico); ya que este tipo de configuraciones presentan una mayor eficiencia de reducción de la carga de niebla de la corriente de gas, al mejorar el aprovechamiento de la sección transversal del elemento con el desarrollo de perfiles de

velocidad más homogéneos en comparación con la instalación convencional horizontal de flujo vertical para separadores horizontales.

### Referencias Bibliográficas

- Acharya, T., & Casimiro, L. (2020). Evaluation of flow characteristics in an onshore horizontal separator using computational fluid dynamics. *Journal of Ocean Engineering and Science*, 5(3), 261-268. <https://doi.org/10.1016/j.joes.2019.11.005>
- Al-Khalifa, H. A., Oshinowo, L., & A. Al-Saif, O. (2017, febrero 8). *Transient Multiphase Simulation in Separator Vessel Internals Design in Saudi Aramco*. ASME 2016 International Mechanical Engineering Congress and Exposition. <https://doi.org/10.1115/IMECE2016-65250>
- Arnold, K., & Stewart, M. (2008). *Surface Production Operations: Design of Oil Handling Systems and Facilities*. Elsevier.
- Basyouny, A. (2022). Sand settling in a three-phase flow inside a horizontal separator. *International Journal of Thermofluids*, 16, 100235. <https://doi.org/10.1016/j.ijft.2022.100235>
- Bothamley, M. (2015). Gas/Liquid Separators: Quantifying Separation Performance - Part 1. *Oil and Gas Facilities*, 2(04), 21-29. <https://doi.org/10.2118/0813-0021-OGF>
- Cornejo Caceres, J. S., Prieto, N., Gonzalez, G., & Chaves-Guerrero, A. (2019). Numerical Simulation of a Natural Gas Cylindrical Cyclone Separator Using Computational Fluid Dynamics. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 58(31), 14323-14332. <https://doi.org/10.1021/acs.iecr.9b01217>
- ESSS. (2023). *Webinar—Cómo mejorar tu simulación fluidodinámica*. ESSS. <https://www.esss.co/es/typ/osdhufi2bweredcdswrfda3wwrefw/>

- Ghaffarkhah, A., Ameri Shahrabi, M., Keshavarz Moraveji, M., & Eslami, H. (2017). Application of CFD for designing conventional three phase oilfield separator. *Egyptian Journal of Petroleum*, 26(2), 413-420. <https://doi.org/10.1016/j.ejpe.2016.06.003>
- Ghaffarkhah, A., Dijvejin, Z. A., Shahrabi, M. A., Moraveji, M. K., & Mostofi, M. (2019). Coupling of CFD and semiempirical methods for designing three-phase condensate separator: Case study and experimental validation. *Journal of Petroleum Exploration and Production Technology*, 9(1), 353-382. <https://doi.org/10.1007/s13202-018-0460-5>
- González S, G. (2012). *Metodologia para aplicar LES ao craqueamento catalítico fluido em um reator riser industrial* [Tesis de Doctorado]. Universidade Estadual de Campinas . Faculdade de Engenharia Química.
- Jiménez, N. P., Silva, G. G., & Guerrero, A. C. G. C. (2019). Revisión del proceso de separación de fases del gas natural a alta presión en la industria Oil&Gas. *Entramado*, 15(1), 312-329.
- Kharoua, N., Khezzar, L., & Saadawi, H. (2013). CFD Modelling of a Horizontal Three-Phase Separator: A Population Balance Approach. *American Journal of Fluid Dynamics*, 3(4), 101-118.
- Krzemianowski, Z., Lackowski, M., Ochrymiuk, T., & Flaszynski, P. (2020). Substitute model and CFD Investigations of a Coalescer in a Three-Phase Crude Oil Gravity Separator. *Journal of Applied Fluid Mechanics*, 13(3), 805-813. <https://doi.org/10.29252/jafm.13.03.30717>
- Laleh, A. P., Svrcek, W. Y., & Monnery, W. D. (2012). Design and CFD studies of multiphase separators—A review. *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, 90(6), 1547-1561. <https://doi.org/10.1002/cjce.20665>

- Ma, H., Zhang, S., & Li, Y. (2022). Numerical simulation on gas–liquid separation characteristics in a GLCC-horizontal combined separator. *Energy Science & Engineering*, 10(10), 3962-3971. <https://doi.org/10.1002/ese3.1266>
- Pourahmadi Laleh, A. (2010). *Cfd simulation of multiphase separators*. <http://hdl.handle.net/1880/104561>
- Prieto Jiménez, N. (2019). *Estudio de la separación de fases del gas natural a alta presión usando dinámica de fluidos computacional (CFD)*. <https://noesis.uis.edu.co/handle/20.500.14071/9629>
- Prieto-Jiménez, N., Fuentes, J., & González-Silva, G. (2021). Computational analysis of homogeneous nucleation and droplet growth applied to natural gas separators. *Revista UIS Ingenierías*, 21(1). <https://doi.org/10.18273/revuin.v21n1-2022007>
- Quiroga, R., González-Estrada, O. A., & González Silva, G. (2021). Effect of Temperature on the Vapour Fraction of Heavy Crude Oil in Hydrodynamic Cavitation Vortex Reactor using CFD. *Ciencia en Desarrollo*, 12(2), 57-65.
- Raynal, L., Augier, F., Bazer-Bachi, F., Haroun, Y., & Fonte, C. (2015). CFD Applied to Process Development in the Oil and Gas Industry – A Review. *Oil & Gas Science and Technology*, 71. <https://doi.org/10.2516/ogst/2015019>
- Tomescu, S., & Bucur, I. O. (2021). Numerical Investigation of Oil Gas Separation with the Use of VOF CFD. *Engineering, Technology & Applied Science Research*, 11(6), 7841-7845. <https://doi.org/10.48084/etasr.4446>
- Zhu, Z. (2017). 3D CFD simulation of Multi-phase flow separators. *Journal of Physics. Conference Series*, 916(1), 12035-. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/916/1/012035>