

Simulación de un mezclador estático horizontal para la dilución de crudo – diluyente
haciendo uso de una herramienta de Dinámica Computacional de Fluidos CFD

Owen Javier Rubio García

Andrés Felipe De La Rosa Rodao

Trabajo de grado para optar por el título de Ingeniero de Petróleos

Director

Germán González Silva

Doctor en Ingeniería Química

Codirectora

Natalia Prieto Jiménez

Doctora en Ingeniería Química



Escuela de Ingeniería
de Petróleos

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

2022

Dedicatoria

Principalmente a Dios que nos ha acompañado durante este largo y fructífero camino de nuestra etapa universitaria, dándonos fortaleza, inteligencia y perseverancia para alcanzar nuestros logros.

A nuestros padres y madres que han sido pilar fundamental de nuestras vidas, brindando apoyo incondicional para con nosotros, a ustedes va dedicado cada triunfo de nuestras vidas.

A nuestros amigos de la carrera y de la vida con los cuales hemos compartido momentos felices, tristes, de extrema emoción, así como de extrema preocupación, creyendo siempre en nuestras capacidades y motivándonos cada día a ser mejores en todos los ámbitos de la vida.

A los profesores que han hecho parte de nuestra formación como profesionales y como personas, son tantas las enseñanzas para la vida, ustedes también hacen parte fundamental de esta meta cumplida.

A cada una de las personas que han estado en este proceso y que nunca dejaron de creer que lo lograríamos, personas fundamentales como doña Laura y don Néstor por recibirme siendo un completo desconocido y hacerme parte de su familia, brindándome cariño y apoyo cuando pasaba por tiempos difíciles. dedicamos este libro y proyecto que con gran esfuerzo logramos.

Agradecimientos

A nuestra alma mater la Universidad Industrial de Santander, por abrirnos las puertas y darnos la oportunidad de cursar una carrera universitaria dentro de ella, proveyéndonos de muchos recursos importantes para nuestro desarrollo profesional.

A nuestros directores, los profesores Germán González Silva y Natalia Prieto Jiménez, por ser un apoyo esencial y pieza clave para el desarrollo del proyecto, sentando las bases y marcando el rumbo de la investigación.

A la escuela de ingeniería de petróleos y la facultad de ingeniería fisicoquímicas por brindarnos las herramientas necesarias para desarrollar nuestra carrera universitaria durante nuestro periodo académico.

A todos los docentes que hicieron parte de nuestro proceso de formación y que nos aportaron muchos conocimientos que perduraran en nosotros, gracias a su compromiso con la academia.

A nuestra familia y amigos por siempre estar presentes y apoyarnos en todo momento.

A nuestros *roomates* de la *Gaming House* y allegados a ella por hacer cada día único y por soportar cada aventura.

A Bucaramanga y su gente por habernos recibido siendo dos foráneos en su hermosa ciudad.

Tabla de Contenido

	Pág.
1. Introducción	10
2. Objetivos	11
2.1 Objetivo General	11
2.2 Objetivos Específicos	11
3. Marco teórico	12
3.1 Crudo pesado y extrapesado.....	12
3.2 Transporte de crudo pesado y extrapesado	16
3.2.1 <i>Dilución</i>	18
3.2.2 <i>Calentamiento de crudo</i>	21
3.2.3 <i>Agentes reductores de viscosidad y DRA</i>	22
3.2.4 <i>Flujo anular</i>	23
3.3 Mezcladores estáticos.....	25
3.4 Dinámica de Fluidos Computacional	29
4. Metodología	36
4.1 Planteamiento del problema.....	36
4.2 Modelo físico.....	36
4.3 Propiedades de los fluidos.....	40
4.4 Condiciones de frontera	41
4.5 Modelo matemático.....	43
4.6 Prueba de independencia de malla	44

5. Resultados y análisis	51
5.1 Perfiles de velocidad	51
5.2 Distribución de la concentración.....	54
5.3 Coeficiente de variación.....	57
5.4 Caída de presión	59
5.5 Eficiencia extensional	61
6. Conclusiones	63
7. Sugerencia para trabajos futuros	64
Referencias Bibliográficas	68

Lista de tablas

	Pag
Tabla 1. Propiedades y composiciones del crudo medio, pesado y extrapesado.	15
Tabla 2. Especificaciones mínimas de calidad para el oleoducto OCENSA.	17
Tabla 3. Efecto de la temperatura sobre la viscosidad en los crudos pesados y extrapesados.	24
Tabla 4. Cuadro comparativo entre un mezclador estático y un agitador convencional.	26
Tabla 5. Aplicaciones de los mezcladores estáticos en múltiples industrias	28
Tabla 6. Datos geométricos del modelo de mezclador	38
Tabla 7. Propiedades de los fluidos usadas para la simulación	40
Tabla 8. Reporte de oblicuidad de las mallas trabajadas	48
Tabla 9. Reporte de ortogonalidad de las mallas trabajadas	49
Tabla 10. Tiempo simulado y CoV estimado para cada enmallado	50

Lista de figuras

Figura 1. Diagrama de métodos para el transporte de crudo pesado y extrapesado por tuberías.	16
Figura 2. Comportamiento de la viscosidad vs temperatura.	20
Figura 3. Diseños de mezcladores estáticos comerciales por diferentes fabricantes.	27
Figura 4. Perfiles de velocidad y presión del viento sobre los buques transportadores.	31
Figura 5. Contorno de erosión y trayectoria de partículas de arena en un codo de tubería.	32
Figura 6. Diseño y patrón de flujo generado por un mezclador estático tipo oblea.	33
Figura 7. Modelos de mezcladores estáticos comerciales y modelo planteado Haddadi et al., 2020.	34
Figura 8. Perfiles de concentración para cada diseño de mezclador estático obtenidos por Haddadi et al.	35
Figura 9. Geometría modelada en Ansys DesignModeler.	38
Figura 10. (a) Vista lateral de malla tetraédrica construida. (b) Corte transversal de la malla generada.	39
Figura 11. Condición de velocidad en la entrada principal y boquilla del mezclador.	41
Figura 12. Comportamiento de residuales hasta llegar a la convergencia.	42
Figura 13. Criterios de calidad de malla. a) Oblicuidad. b) Ortogonalidad.	45
Figura 14. Distribución de calidad de volúmenes de malla. (a) oblicuidad (b) ortogonalidad.	47
Figura 15. Prueba de independencia de malla. Valores simulados de CoV en el punto Z=32 in.	51
Figura 16. Contornos de velocidad transversales obtenidos.	52

Figura 17. Secuencia detallada de la formación de zonas de velocidad en la geometría interna del mezclador.	53
Figura 18. Plano lateral de la fracción másica de nafta a través de toda la geometría.	55
Figura 19. Fracción másica de nafta en los planos $L/D= 4, 6, 8, 10, 12, 14$.	56
Figura 20. Contorno de fracción másica $L/D=4$ representado como distribución en un plano cartesiano.	57
Figura 21. Comportamiento de CoV en diferentes puntos a lo largo del mezclador: (a) general (b) en detalle.	58
Figura 22. Comparación caída de presión con resultados obtenidos por Jiang et al.	60
Figura 23. Valores de presión promedio vs longitud del mezclador.	60
Figura 24. Distinción gráfica entre (a) mezclado dispersivo y (b) mezclado distributivo	61
Figura 25. Eficiencia extensional a lo largo de la zona de mezclado	62
Figura 26. Matriz de modelos geométricos planteada como sugerencia para trabajos futuros.	66

Resumen

Título: Simulación de un mezclador estático horizontal para la dilución de crudo - diluyente haciendo uso de una herramienta de Dinámica Computacional de Fluidos CFD¹

Autores: Owen Javier Rubio García, Andrés Felipe de la Rosa Rodao²

Palabras Clave: Mezclador estático, CFD, Dilución de crudo, Simulación, Crudo pesado, Nafta

Teniendo en cuenta que las reservas de crudo pesado y extrapesado a nivel mundial están tomando un papel más protagónico debido al agotamiento de los recursos livianos, es importante enfocar estudios hacia el desarrollo de este tipo de yacimientos. Uno de los principales desafíos con este tipo de crudos es su transporte por tubería, el cual se ve limitado por sus altas densidades y viscosidades. Una solución económica y de fácil implementación a este problema es el uso de mezcladores estáticos para diluir el crudo pesado con componentes más livianos.

La correcta selección de un mezclador estático comercial es importante para evitar sobrecostos de tiempo y dinero en la operación. Con este fin se pueden incluir estudios experimentales o simulaciones numéricas, o una combinación de ambos, para probar diferentes geometrías y tamaños de mezcladores buscando aquella que genere los mejores resultados de mezcla.

En este trabajo se plantea todo el estudio numérico para la evaluación del desempeño de un mezclador estático tomando como fluidos para la simulación un crudo pesado de alta viscosidad y nafta, cuyas propiedades son extraídas de la literatura. La solución y análisis del problema se realiza a través de la Dinámica Computacional de Fluidos (CFD), la cual es una herramienta para los problemas sobre el flujo de fluidos.

¹ Trabajo de Grado

² Facultad de Ingeniería Físicoquímicas. Escuela de Petróleos. Director: Germán González Silva. Ingeniero Químico, Ph.D. Codirectora: Natalia Prieto Jiménez. Ingeniera Química, Ph.D.

Abstract

Title: Simulation of a horizontal static mixer for the dilution of heavy oil – diluent using a Computational Fluid Dynamics CFD tool.³

Author: Owen Javier Rubio García, Andrés Felipe de la Rosa Rodao⁴

Key Words: Static mixer, CFD, Crude oil dilution, Simulation, Heavy oil, Nafta

Bearing in mind that the reserves of heavy and extra-heavy oil worldwide are taking a more leading role due to the depletion of light resources, it is important to focus studies on the development of this type of reservoir. One of the main challenges with this type of oil is its transport by pipeline, which is limited by its high densities and viscosities. An economical and easy-to-implement solution to this problem is the use of static mixers to dilute heavy oil with lighter components.

The correct selection of a commercial static mixer is important to avoid cost overruns of time and money in the operation. To this end, experimental studies or numerical simulations, or a combination of both, can be included to test different geometries and sizes of mixers looking for the one that generates the best mixing results.

In this work, the entire numerical study is proposed for the evaluation of the performance of a static mixer, taking as fluids for the simulation a high viscosity heavy crude oil and naphtha, whose properties are extracted from the literature. The solution and analysis of the problem is carried out through Computational Fluid Dynamics (CFD), which is a tool for fluid flow problems.

³ Degree Work

⁴ Physicochemical Engineering Faculty. Petroleum Engineering School. Director: Germán González Silva. Chemical Engineer, Ph.D. Co-director: Natalia Prieto Jiménez. Chemical Engineer, Ph.D.

1. Introducción

Los mezcladores estáticos cumplen con la tarea de mezclar dos fluidos y generar un efecto de dispersión mientras son bombeados a través de una línea de tubería. Esta función está relacionada a la movilización del crudo, puede repercutir indirectamente en operaciones como su producción, tratamiento, la integridad de las líneas y equipos, entre otros. La correcta selección y desempeño de un mezclador estático está estrechamente relacionada con su diseño, por lo tanto, el uso de herramientas de procesamiento computacional se hace indispensable.

La Dinámica Computacional de Fluidos (CFD) nos permite realizar el modelamiento de procesos, que bien pueden ser dinámicos o estáticos, a partir de la solución de ecuaciones de conservación de movimiento, energía y masa. El uso de esta herramienta genera múltiples ventajas, como la simulación de condiciones de flujo que pueden ser difíciles, o incluso peligrosas, de recrear en laboratorio. Además, permiten variar tanto el diseño como las condiciones de operación sin complicaciones de disponibilidad de equipos, con el objetivo de desarrollar un análisis más completo del problema.

La implementación de CFD le permite al ingeniero analizar en detalle los diferentes componentes que conforman el sistema, todo esto al tiempo que ocurre el proceso que se está simulando, lo que aporta información valiosa en su optimización.

Este trabajo está orientado a realizar una metodología general para un crudo pesado de un mezclador estático para una mezcla de crudo - diluyente por medio de técnicas de Dinámica Computacional de Fluidos (CFD).

2. Objetivos

2.1 Objetivo General

Realizar la simulación de un mezclador estático para la dilución de crudo – diluyente, utilizando técnicas computacionales de CFD.

2.2 Objetivos Específicos

Seleccionar el tipo de crudo pesado y diluyente, y sus propiedades fisicoquímicas a partir de información reportada en la literatura.

Seleccionar el tipo y la configuración del mezclador estático de acuerdo con los modelos comerciales disponibles, criterios de selección, y su aplicabilidad a las condiciones de flujo planteadas.

Generar un modelo del mezclador utilizando un programa de diseño asistido por computador (CAD).

Definir las condiciones de frontera para la simulación y llevar a cabo una prueba de independencia de malla.

Analizar la eficiencia de mezclado para establecer recomendaciones que permitan mejorarla en caso de que sea posible.

3. Marco teórico

Antes de empezar a desglosar las diferentes temáticas que abarca este proyecto de investigación, es necesario tener una visión general de cuáles son los temas principales de los que se deben tener conocimiento para dar un buen desarrollo a este trabajo. Primero se realiza una revisión al tema de los crudos pesados y extrapesados, pues su transporte establece desafíos para la industria y se relaciona estrechamente con la implementación de mezcladores estáticos. En segundo lugar, se expone el amplio rango de diseños comerciales de mezcladores estáticos para su aplicación en diferentes industrias y, por último, se adentra en los múltiples estudios que se han realizado utilizando técnicas de Dinámica Computacional de Fluidos.

3.1 Crudo pesado y extrapesado.

En el último cuarto del siglo XX, la demanda mundial de crudo tuvo una tasa de crecimiento anual muy estable, con una media del 1%. Esto ha cambiado radicalmente en los primeros años del siglo XXI debido a los "países emergentes" como China e India, cuyas dinámicas economías dieron lugar a un notable crecimiento mundial de la demanda de crudo del 1,8% en 2009 (AIE, 2010). Estudios internacionales serios siguen previendo que, en los próximos 20 años, al menos el 80% de las necesidades energéticas del mundo provendrán del petróleo, el gas natural y el carbón. Por consiguiente, el petróleo seguirá siendo la fuente de energía dominante durante el próximo medio siglo. Según algunas estimaciones de la Agencia Internacional de la Energía (Pinto Sánchez, 2021), el petróleo pesado representa al menos la mitad de los recursos petrolíferos recuperables del mundo. El petróleo pesado se define como el que tiene una densidad igual o inferior a 20 API,

pero si el petróleo tiene 10 API o menos se considera como petróleo extrapesado o betún, que es más denso que el agua. La diferencia entre betún y petróleo extrapesado es ambigua y suele referirse a la tecnología de producción, por lo que incluiremos ambos bajo el término de petróleo extrapesado. Como marco de referencia de calidad, el petróleo convencional, como el *Brent* o el *West Texas Intermediate*, tienen una densidad que oscila entre 38 y 40 API.

En los últimos años se ha visto un aumento en la producción de crudo pesado y extrapesado en varias regiones como el Golfo de México y el noreste de china (Pinto Sánchez, 2021), debido a que se necesitó y se sigue necesitando sustituir la decreciente producción petróleo convencional medio y ligero. Por ello, existe un creciente interés por el uso de recursos petrolíferos pesados y extrapesados no convencionales para producir combustibles y productos petroquímicos. La incorporación del petróleo pesado a los mercados energéticos ha presentado importantes retos que requieren importantes desarrollos tecnológicos en la cadena de producción (Contreras–Mateus, 2021).

El transporte de petróleo pesado y extrapesado presentaron al principio muchas dificultades operativas que limitaban su viabilidad económica, hoy en día se siguen presentando, pero cada vez hay más tecnologías que ayudan al manejo de este problema. Países como China, Japón o EE.UU., con una creciente demanda energética, promueven la reestructuración de sus industrias de refinería para manejar este crudo no convencional. En la actualidad, el petróleo pesado y extrapesado es más barato que el convencional y el margen de refinamiento puede ser mayor si se maneja adecuadamente, con mayores beneficios por barril. Los oleoductos son el medio más conveniente para el transporte de crudos y productos derivados, de forma continua y económica. Sin embargo, el transporte de crudos pesados y extrapesados a través de oleoductos es difícil debido a la escasa

movilidad y fluidez del crudo y a la deposición de cera y asfáltenos en las superficies de las paredes de los oleoductos. Sin embargo, uno de los problemas tecnológicos con respecto a el acceso del petróleo extrapesado a los mercados energéticos es el problema del transporte por oleoducto, como ya se ha mencionado anteriormente.

La alta viscosidad (103 a 106 cP @ ≈ 100 °F) y la baja gravedad API (crudo pesado menos de 20 API, crudo extrapesado menos de 10 API) de estos aceites se deben a la elevada presencia de asfáltenos, así como a una proporción relativamente baja de compuestos de bajo peso molecular, que representan una falta de componentes ligeros. Los crudos pesados y extrapesados también pueden tener altos contenidos de azufre, sales y metales como el níquel y el vanadio (Tabla 1). El transporte por oleoducto del petróleo pesado presenta problemas como la inestabilidad de asfáltenos, la precipitación de parafinas y la alta viscosidad que provocan flujo multifásico, obstrucción de las tuberías, caídas de alta presión y paradas de producción.

En la actualidad, consideramos que existen tres enfoques generales para el transporte de petróleo pesado y extrapesado: la reducción de la viscosidad, la minimización del arrastre y la mejora del petróleo in situ. La reducción de la viscosidad del petróleo puede lograrse mediante a) la dilución con otras sustancias; b) la formación de una emulsión de aceite en agua (Pinto Sánchez, 2021), c) aumentando y/o conservando la temperatura del petróleo y/o d) reduciendo el punto de fluidez del petróleo crudo (Abarca, 2020). La segunda alternativa consiste en reducir la fricción entre el oleoducto y el petróleo pesado mediante a) la adición de sustancias que reduzcan el arrastre dentro del oleoducto (aditivos reductores de la fricción) y/o b) el desarrollo de un tipo de flujo diferente (anular, de lodos). Por último, la mejora fisicoquímica de petróleo pesado produce un combustible sintético con mayor gravedad API, menor viscosidad y menor contenido de

contaminantes como azufre y nitrógeno. La combinación de dos o más de estos enfoques puede utilizarse para resolver o mejorar el transporte por tuberías del crudo pesado y crudo pesado y extrapesado, ya que no existen soluciones tecnológicas únicas. En este trabajo nos enfocaremos en el primer enfoque, principalmente en la reducción de la viscosidad mediante dilución con otras sustancias como la nafta.

Tabla 1.

Propiedades y composiciones del crudo medio, pesado y extrapesado.

Parámetros	Tipos de crudo		
	Medio	Pesado	Extrapesado
Gravedad API	21,27	11,90	9,17
Peso molecular (g/mol)	314,8	486	507,8
Contenido de sulfuro (%)	3,40	5,02	4,80
Contenido de agua (%)	1,80	0,05	<0,05
Análisis SARA			
Saturados	26,53	7,94	15,00
Aromáticos	14,74	5,28	19,11
Resinas	47,60	70,93	46,78
Asfáltenos (desde n-C7)	11,13	15,85	19,11

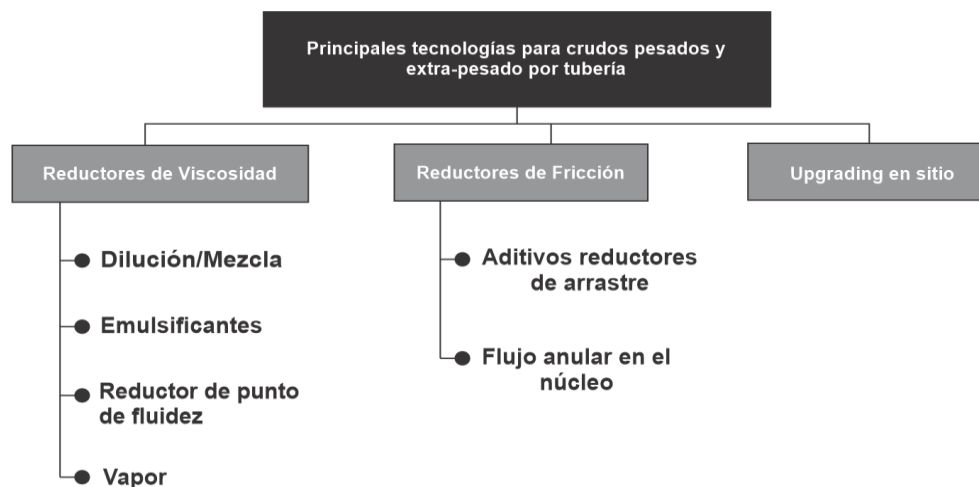
Nota. Adaptado de Murillo-Hernández *et al.* (2009) y, Castro y Vázquez (2009).

3.2 Transporte de crudo pesado y extrapesado

Los crudos pesados y extrapesados son los fluidos que más presentan inconvenientes en su transporte a través de tuberías debido a sus características particulares. El problema radica principalmente en las altas viscosidades que este tipo de hidrocarburos presenta, por lo que es necesario implementar altos diferenciales de presión en las bombas, grandes diámetros y cortas distancias de línea para movilizarlos (Sánchez Peralta, 2017). Desde el punto de vista económico, estas estrategias no son viables y la necesidad de llevar este petróleo desde los lugares alejados donde se producen hasta las facilidades que los tratan, ha llevado a la industria de los hidrocarburos a encontrar nuevas formas de solucionar estos problemas, apelando al uso de nuevas tecnologías que permitan mejorar la capacidad de flujo de estos fluidos (Contreras–Mateus, 2021). Entre las cuales se tienen:

Figura 1.

Diagrama de métodos para el transporte de crudo pesado y extrapesado por tuberías.



Nota. A review of technologies for transporting heavy crude oil and bitumen via pipelines. J Petrol Export Prod Technol (2014). Abarasi Hart.

Existen factores de calidad importantes a la hora de transportar el crudo en oleoductos los cuales se encuentran en la resolución 72145 de 2014 el ministerio de minas y energía (Minenergía) donde se reglamentan los diferentes aspectos del transporte de crudos por oleoductos. Dentro de esta, en los artículos 4 y 5 se contemplan las obligaciones de los terceros interesados en el transporte del crudo y de la entidad encargada del oleoducto, denominada el transportador (ENERGÍA, 2014) .

Tabla 2.

Especificaciones mínimas de calidad para el oleoducto OCENSA.

Parámetro	Valor del parámetro	Método de ensayo
Agua y Sedimento	Máximo 0,8% en volumen	Agua – Karl Fisher ASTM D4377 Sedimentos – ASTM D473
Gravedad API a 60 °F	Igual o superior a 18 °API pero inferior a 21,1 °API	ASTM - D1298
Viscosidad a la temperatura de referencia	Máximo 300 cSt a 30 °C	ASTM – D445
Presión de vapor REID	Máximo 9 lb/in ²	ASTM D323
Temperatura de recibo	Máximo 105 °F	
Contenido de sal	Máximo 20 PTB	ASTM D 3230
Punto de fluidez	≤ 6 °C	ASTM D93
Contenido de azufre	≤ 2% en peso	ASTM D4294 Espectrometría de Fluorescencia
TAN (Número de acidez total)	≤ 0,8 mgKOH/g	ASTM D664

Nota: Adaptado de OCENSA. Manual del transportador. 2011

En esta resolución se especifica que cada transportador debe implementar y emitir su Boletín de Transporte por Oleoducto (BTO), el cual debe mantenerse actualizado y ser de libre acceso. Este documento debe contar con una información mínima, dentro de la cual se encuentran las especificaciones de calidad para el crudo que se transporta por el oleoducto y el procedimiento a seguir para el rechazo de los que no cumplan con estas especificaciones.

De acuerdo con lo anterior se presenta la tabla 2, en la que se encuentran las especificaciones mínimas de calidad para el transporte de petróleo pesado a través del Oleoducto OCENSA. Además, también se incluyen las pruebas estandarizadas ASTM para la determinación del valor de cada uno de los parámetros.

3.2.1 Dilución

La dilución, en términos generales, es la mezcla de crudo pesado con un solvente o un crudo de mayor °API. Esta mezcla de componentes tiene como resultado la reducción de la viscosidad y la densidad del crudo original hasta conseguir una mezcla operacionalmente manejable. El objetivo de este método es proporcionar una alternativa económica y ambientalmente aceptable para su producción, tratamiento y posterior transporte del crudo por el oleoducto. Es uno de los métodos de transporte por tubería más utilizados y antiguos en la industria petrolera desde la década de 1930 (Pinto Sánchez, 2021).

Para esta técnica es importante determinar la calidad y cantidad de diluyente necesario para conseguir la mezcla con los parámetros de calidad necesarios para el transporte en línea. La cantidad de diluyentes necesaria para crudos pesados varía de 0 a 20%; para los crudos extrapesados está en el rango de 20 a 50% (Cano, 2015).

Además, se debe contar con las buenas fuentes de abastecimiento y un eficaz sistema de inyección de diluyente. Por lo anterior, se requiere una inversión económica considerable a parte de los gastos de transporte del crudo. Los diluyentes más utilizados en el transporte de crudo pesado son:

Crudos livianos

Si se posee los volúmenes suficientes, es una alternativa viable ya que reduce la viscosidad mejorando el bombeo del crudo. Sin embargo, este diluyente tiene la desventaja de precipitar asfáltenos y parafina si no se analiza la compatibilidad entre los fluidos; sin mencionar los altos costos de adquisición.

Nafta

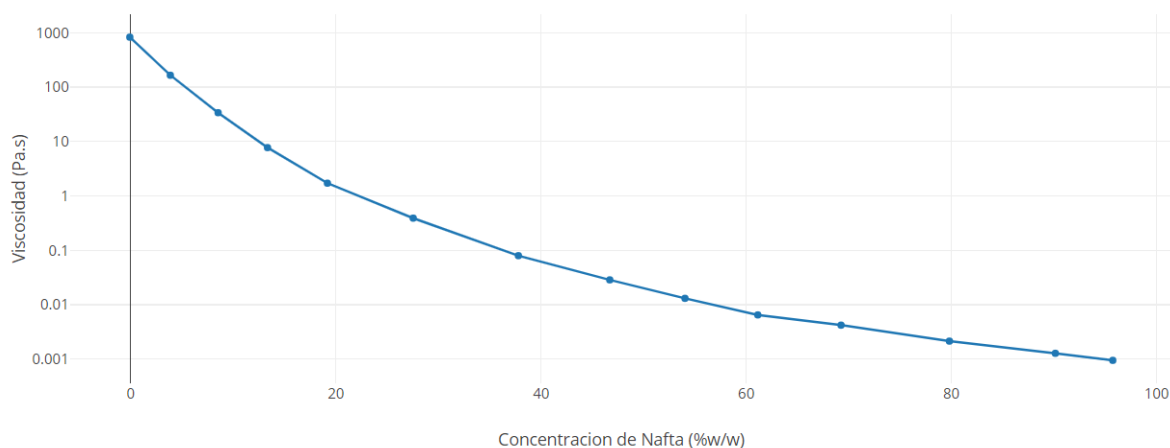
La nafta al ser un derivado del petróleo obtenido de la parte más superior de la torre de destilación se puede usar como diluyente o adelgazante, siendo esta la opción más utilizada en Colombia. Posee una elevada gravedad API y muestra buena compatibilidad con los asfáltenos. Sin embargo, este diluyente tiene la desventaja de ser inflamable por lo cual, requiere un manejo y almacenamiento especial; además, tiene un considerable costo de la adquisición.

Uno de los aspectos más importantes que se deben tener en cuenta es la disponibilidad y el reciclaje que se le pueda dar al diluyente que se usará para reducir la viscosidad del crudo. Por esto, de los dos diluyentes mencionados anteriormente, la nafta como ya se mencionó suele ser generalmente la opción más utilizada en Colombia debido a su alta gravedad API, su eficiencia en la dilución de crudos pesados, su buena compatibilidad con asfáltenos y es fácilmente

reciclable (Sánchez Peralta, 2017). La figura 2 muestra la evolución de la viscosidad de la mezcla de un crudo pesado con nafta para diferentes concentraciones de nafta. Se puede apreciar que la viscosidad disminuye en gran manera con el aumento de la concentración del diluyente.

Figura 2.

Comportamiento de la viscosidad vs temperatura.



Nota: adaptado de Argillier, J.-F., Henaut, I., Gateau, patrick, HERAUD, J.-P., & GLENAT, P. (2005, January 1). Heavy Oil Dilution. Society of Petroleum Engineers. doi:10.2118/97763-MS

Los condensados provenientes del gas natural generalmente son una buena opción, cuando se usan constituyen del 24% al 50% de la mezcla (Sánchez A.F.P., 2017). Algunas desventajas de su uso es la disponibilidad de estos que está asociada con la demanda de gas natural. Además, otro inconveniente que se puede presentar con el uso de estos disolventes es la precipitación de asfáltenos, que puede resultar en un taponamiento total o parcial de las líneas

de transporte, por lo que es necesario conocer las propiedades del crudo al que se le aplicará el proceso.

3.2.2 Calentamiento de crudo

La propiedad más determinante en el transporte de crudo pesado y extrapesado es la viscosidad. Esta característica es particularmente sensible a los cambios de temperatura y es el fundamento base para considerar los métodos de calentamiento como alternativa para mejorar el transporte de los hidrocarburos pesados (Bernal Ospina, 2016).

El efecto de la temperatura sobre la viscosidad está en función de la composición y la volatilidad del crudo. El incremento de la temperatura durante el transporte afecta principalmente las estructuras macromoleculares del aceite, separándolas y manteniendo las unidades del monómero dispersas; como consecuencia, se mejora la resistencia al flujo.

Es bien conocido que la temperatura tiene relación directa con las propiedades reológicas del crudo, provocando cambios que pueden llegar a ser inestables. Estudios realizados para entender la influencia de la temperatura en el crudo, comprobaron que el aceite pesado se comporta como un fluido pseudoplástico; en donde la variación de la temperatura tiene poco efecto en el índice de flujo, pero es determinante en la viscosidad aparente, relacionando esta propiedad para diferentes crudos colombianos, y en el índice de consistencia másica. A partir de lo anterior, es posible definir la energía necesaria para mejorar el transporte de crudo pesado y extrapesado.

Para instalar un sistema de calentamiento en oleoductos se deben considerar aspectos técnicos como:

- Expansión de la tubería
- Cantidad y capacidad de suministro de energía de las estaciones de bombeo
- Pérdidas de calor en las líneas
- Corrosión interna de la tubería por efecto térmico

Ahora bien, la viabilidad de la instalación de un sistema de calentamiento está directamente relacionada con los costos asociados. A medida que aumenta la distancia y etapas de calentamiento para reducir el costo en el bombeo convencional, el costo de operación se verá incrementado. Por lo cual, el análisis económico es el factor determinante en la aplicación de este método (Oñate Morales, 2012).

3.2.3 Agentes reductores de viscosidad y DRA

En el flujo de fluidos, la fricción con la pared de las tuberías genera una caída de presión que tiende a ser mucho más alta en el caso de crudos pesados que con crudos livianos. Por esta razón la reducción de la fricción es una técnica que conviene en el transporte de crudos pesados. Los agentes reductores de fricción (DRA) son materiales que reducen la pérdida de presión por fricción durante el flujo de fluidos en líneas u oleoductos. Esto se logra al reducir el nivel de movimiento turbulento en un flujo.

El uso de DRA permite un mayor flujo en el oleoducto usando la misma cantidad de energía o menor caída de presión para la misma tasa de flujo. Los agentes reductores de fricción

actuales consisten en polímeros de hidrocarburo de larga cadena que actúan como inhibidores de turbulencia a lo largo de la pared del oleoducto.

Entre las ventajas que surgen del uso de agentes reductores de fricción se tiene que son una herramienta rápida para reducir y controlar la presión del oleoducto sin comprometer el bombeo. También se reducen los costos energéticos al ahorrar energía de bombeo.

3.2.4 Flujo anular

En el transporte de crudo pesado y extrapesado es muy importante contar con tecnologías para el aseguramiento de flujo, esto debido a que hay riesgos asociados a los altos valores de viscosidad que se pueden presentar durante la producción y el transporte de este tipo de crudos. Este factor es muy importante, en especial cuando se producen paros no programados del sistema de transporte, ya que los hidrocarburos pueden alcanzar la temperatura del medio y, como vimos anteriormente, debido a que la temperatura tiene una estrecha relación con la viscosidad, esta puede aumentar significativamente causando una sobre presión en el re arranque.

Debido a los problemas operacionales que pueden surgir relacionados a las enormes viscosidades presentadas por este tipo de crudos y a los patrones de flujo indeseados que se pueden presentar, se han desarrollado diferentes tecnologías para el aseguramiento del crudo, las cuales se pueden apreciar en la tabla 3. En esta sección nos centraremos en el flujo anular.

Tabla 3.

Efecto de la temperatura sobre la viscosidad en los crudos pesados y extrapesados.

Tecnologías para el aseguramiento del flujo de crudos pesados y extrapesados	
Dilución con hidrocarburos ligeros	Calentamiento activo
Calentamiento pasivo	Flujo lubricado (flujo anular)
Mejoradores de flujo con productos químicos	Mejoramiento de crudo

Nota: adaptado de Aranda Bermúdez, Rafael. Métodos para el Transporte de Aceites Pesados y Extrapesados. Trabajo de grado profesional en Ingeniería de Petróleos. Ciudad de México. Universidad Autónoma de México, 2016.

El flujo anular consiste en la formación de un anillo que se encuentre en contacto con las paredes de la tubería, este anillo es formado a partir de un fluido lubricador. El objetivo es lograr una reducción de la viscosidad en la zona cercana a las paredes del tubo para disminuir las fuerzas de contraflujo dentro del ducto, ejercidas por la alta viscosidad del crudo pesado. Existen varias tecnologías para el flujo anular, las cuales se repasarán a continuación:

Hidro transporte: esta técnica consiste en formar un anillo de agua alrededor de la pared interna del ducto, haciendo que el flujo de aceite se produzca en el seno de este. De esta manera, debido a la baja viscosidad del agua en comparación con los crudos pesados, se logra reducir las fuerzas de fricción generadas en las paredes internas. Se debe tener cuidado especial con que el agua no penetre el seno de aceite formando emulsiones directas que provocarían pérdidas de presión.

Productos químicos: la inyección de los productos químicos puede ser continua o intermitente, de acuerdo con la demanda del sistema de transporte. En este caso el producto químico se encarga de envolver la interfaz de crudo, reduciendo de esta manera las pérdidas de presión.

3.3 Mezcladores estáticos

La mezcla es un proceso en el que dos o más componentes son sometidos a determinada turbulencia para generar un sistema disperso, que puede ser homogéneo o heterogéneo dependiendo de la naturaleza de los componentes. Estos componentes que conforman la mezcla pueden ser sólidos, líquidos o gases y, además, pueden ser miscibles o inmiscibles. Además, las propiedades físicas de la mezcla pueden ser diferentes a las de sus componentes. Cuando el proceso de mezclado forma parte de la cadena de procesos de una operación, el valor del resultado final y los costos de energía pueden depender directa o indirectamente de la calidad obtenida en la etapa de mezclado.

Los equipos utilizados para realizar el proceso de mezclado se pueden clasificar en dos tipos: tanques agitadores y equipos de mezclado en línea. El mezclado en tanques agitadores puede realizarse por medio de agitación mecánica, chorros o burbujeo de gas; siendo la agitación mecánica el mecanismo más implementado usualmente. Además, este tipo de equipos pueden trabajar de manera continua o por baches (Díaz Aburto, 2016). Dado que estos poseen partes móviles también son conocidos como mezcladores dinámicos, pues trabajan con motores eléctricos y uno o varios impulsores giratorios que se encargan de crear el patrón de flujo necesario para el mezclado. Cuando se trabaja con fluidos altamente viscosos en un régimen altamente turbulento, los mezcladores dinámicos requieren una gran cantidad de energía para mezclar el fluido, lo cual se puede hacer la operación poco eficiente e incrementar costos.

Los equipos de mezclado en línea se ubican en una parte del tramo de la línea del proceso y también son conocidos como mezcladores estáticos. Estos dispositivos son ampliamente usados en todo tipo de operaciones debido a la versatilidad que suponen. Se componen de una sección de

tubería con elementos inmóviles instalados en su pared interna, los cuales tienen el objetivo de rotar, dividir y recombinar el flujo de entrada para generar la mezcla. Debido a que no poseen partes móviles, la mezcla depende solamente del movimiento de las corrientes de flujo a través de sus elementos internos. Esta conversión de la energía cinética que posee el fluido en energía mecánica de mezcla ocasiona una caída de presión que debe ser suplida por una bomba externa (Diaz Aburto, 2016). Desde el criterio ingenieril, un mezclador estático ideal será el que proporcione la eficiencia de mezcla deseada con una caída de presión mínima (Soman, 2016). Los mezcladores estáticos presentan algunas ventajas sobre los mezcladores convencionales, en la tabla 4 se pueden apreciar las más significativas.

Tabla 4.

Cuadro comparativo entre un mezclador estático y un agitador convencional.

Mezclador estático	Agitador convencional
Poco requerimiento de espacio	Amplio requerimiento de espacio
No posee partes móviles	Impulsores y motor
Tiempos de residencia corto	Largos tiempos de residencia
Cambios de equipo rápidos	Cambios de equipo pueden generar gastos
Equipo de bajo costo	Equipo de alto costo
No requiere mantenimiento	Requiere mantenimiento

Nota: adaptado de (THAKUR et al., 2003)

Existen múltiples diseños comerciales de mezcladores estáticos en los que varía principalmente la geometría de sus elementos internos, los cuales pueden tener forma helicoidal, de cuchilla, placas corrugadas, entre otros. Cada geometría está diseñada para un rango de aplicación

específico y se diferencian en el comportamiento que desarrolla el flujo al pasar a través de ella. En concordancia con la amplia variedad de diseños, también es amplia la variedad de aplicaciones de los mezcladores estáticos en los procesos, tales como el mezclado de fluidos miscibles, fluidos inmiscibles, dispersión de líquidos viscosos, transferencia de masa, transferencia de calor, y dispersión gas-líquido o sólido-líquido (Haddadi et al., 2020). En la figura 3 se pueden distinguir algunos modelos de mezcladores estáticos de diferentes fabricantes.

Figura 3.

Diseños de mezcladores estáticos comerciales por diferentes fabricantes.



Nota: (a) Serie Kenics® HEV de Chemineer (b) Serie Kenics® KM de Chemineer (c) Mezclador LLPD de ROSS (d) Series 45 Inliner de SPXFLOW (e) Mezclador SMX™ Plus de Sulzer (f) Mezclador Serie A de Komax.

Como se mencionó anteriormente, los mezcladores estáticos tienen un amplio rango de aplicaciones industriales. A continuación, se enlista una muestra de sus aplicaciones a nivel industrial en diferentes áreas.

Tabla 5.

Aplicaciones de los mezcladores estáticos en múltiples industrias.

<i>Químicos</i>	<ul style="list-style-type: none"> - Mezclado de gases frente a reactores catalíticos (ej., la producción de estireno) - Calentamiento y enfriamiento controlado de lodos en la producción de catalizadores - Neutralización o ajuste de pH de las corrientes de proceso con ácido - Proceso de homogenización y flujo de productos para muestreo representativo
<i>Energía</i>	<ul style="list-style-type: none"> - Mezcla de gas de horno alto y horno de coque - Mezcla de gases combustibles con aire antes de la combustión - Recalentamiento de gases de combustión en plantas de desulfuración
<i>Cosméticos y detergentes</i>	<ul style="list-style-type: none"> - Mezclado de componentes de pasta de dientes, lociones, champú, jabones, o detergentes - Sulfonación de alcoholes grasos con óleum - Saponificación de grasas con soda cáustica - Dilución de surfactantes
<i>Gas natural</i>	<ul style="list-style-type: none"> - Lavado de H₂S de gas natural con productos químicos cáusticos o especiales - Deshidratación de gas natural con glicoles - Refrigeración del gas natural en el circuito del compresor de terminales de GNL por inyección y vaporización GNL
<i>Petroquímicos</i>	<ul style="list-style-type: none"> - Lavado de componentes ácidos con cáustica de los gases de escape durante la regeneración del catalizador - Mezcla de etilbenceno con corriente antes del primer reactor de deshidrogenación en plantas de estireno - Cloración de hidrocarburos (ej., etileno a EDC)
<i>Refinación</i>	<ul style="list-style-type: none"> - Desalación de crudo con agua - Dispersión de ácido sulfúrico en hidrocarburos en procesos de alquilación

	<ul style="list-style-type: none"> - Mezcla de diferentes corrientes de hidrocarburo y aditivos en gasolina - Edulcorado de queroseno y gasolina con cáustico - Ajuste de la viscosidad del crudo pesado con gasóleo y otros aditivos
--	--

Nota: Adaptado de (Thakur et al., 2003)

3.4 Dinámica de Fluidos Computacional

La dinámica de fluidos computacional, ampliamente conocida como CFD, es una rama de la dinámica de fluidos en la que se combinan el cálculo numérico y los algoritmos para dar solución a los problemas que involucren flujo de fluidos, transferencia de calor, reacciones químicas, combustión, aeroacústica, entre otros. Físicamente, cualquier flujo de fluido es gobernado por tres principios fundamentales: (1) la masa se conserva, (2) la energía se conserva, y (3) la segunda ley de Newton. Estos principios pueden ser descritos con ecuaciones matemáticas, que normalmente vienen en la forma de ecuaciones integrales o ecuaciones diferenciales parciales. CFD es el arte de reemplazar las integrales o las derivadas parciales de estas ecuaciones con formas algebraicas discretizadas, para dar una solución en términos numéricos al campo de flujo (Wendt et al., 2009).

En la dinámica de fluidos existen tres aproximaciones para el estudio de los problemas flujo: la aproximación teórica; la aproximación experimental y la dinámica de fluidos computacional. Esta tercera aproximación, desarrollada a finales del siglo XX, aprovecha el elevado potencial de cálculo de las computadoras modernas y permite, a su vez, desarrollar estudios bastante precisos de problemas que pueden ser difíciles o incluso peligrosos para llevar a cabo en un ambiente experimental. Además, CFD permite reducir costos cuando sus resultados se usan como un primer filtro para dar un mejor direccionamiento a una investigación en un problema de alta complejidad donde no se quieren comprometer demasiados recursos económicos.

La dinámica de fluidos computacional tiene aplicaciones en medicina (Feurhuber et al., 2021), motores (Rajeesh et al., 2021), aeronáutica (Kumar Cheeda et al., 2008), ingeniería civil (Cao et al., 2021), arquitectura naval (Wang et al., 2020), diseño de ambiente de interiores (Morozova et al., 2020), energías renovables (Selimefendigil & Öztop, 2021), entre muchas otras. Además, con la implementación de tecnologías como la inteligencia artificial, el aprendizaje de máquinas, y la relación rendimiento-costo de las GPU's actuales se está impulsando la próxima generación de aplicaciones de CFD, orientadas principalmente a la reducción de costos y tiempo en los ciclos de diseño de vehículos y aeronaves. Según el Dr. Neil Ashton, arquitecto principal de soluciones especializado en CFD en Amazon Web Services, “Estamos observando un gran incremento en el número de compañías que desean moverse a procesos de diseño más basados en simulación”. Esto es debido a que construir un vehículo o un avión para propósitos de prueba puede añadir meses o incluso años al ciclo de diseño mientras que las capacidades computacionales modernas poseen el potencial para simulaciones completas de automóviles o aeronaves enteras (Hemsoth, 2021).

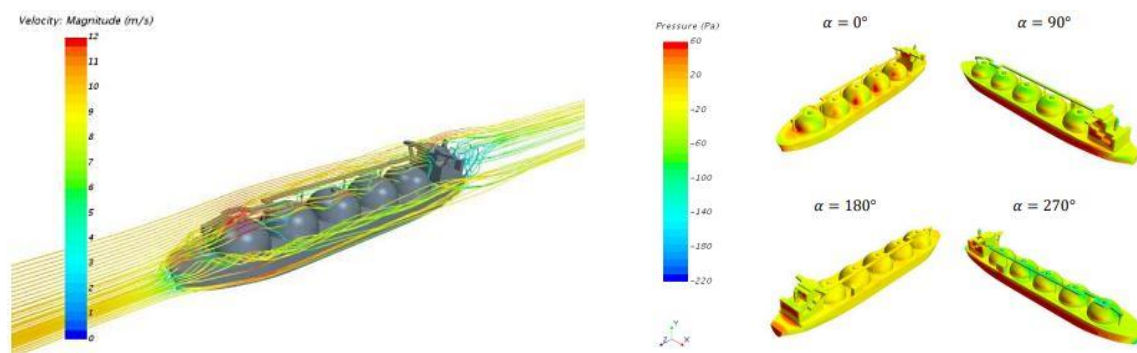
CFD en la industria de los hidrocarburos y mezcladores estáticos

La naturaleza de los desafíos que se presentan en la industria del aceite y gas hacen de CFD una herramienta poderosa y vastamente empleada para su solución. Uno de los desafíos más comunes en el ámbito de la producción *offshore* es el impacto generado por las condiciones marítimas en las plataformas petroleras y los buques transportadores. (Zhang et al., 2021) estudiaron el flujo de viento sobre un transportador de GNL GALEA para determinar las cargas generadas por los perfiles de viento en diferentes ángulos; una predicción precisa de estas cargas es importante para la seguridad de la maniobra, la descarga o el posicionamiento dinámico de la nave. En la figura 4

se pueden apreciar algunos resultados de este estudio. Por su parte, (Tsai, 2015) desarrolla un modelo de la temperatura de globo y bulbo húmedo (TGBH) para evaluar el estrés por calor para la seguridad de los trabajadores en una plataforma costa afuera con instalaciones de procesamiento de aceite.

Figura 4.

Perfiles de velocidad y presión del viento sobre los buques transportadores.



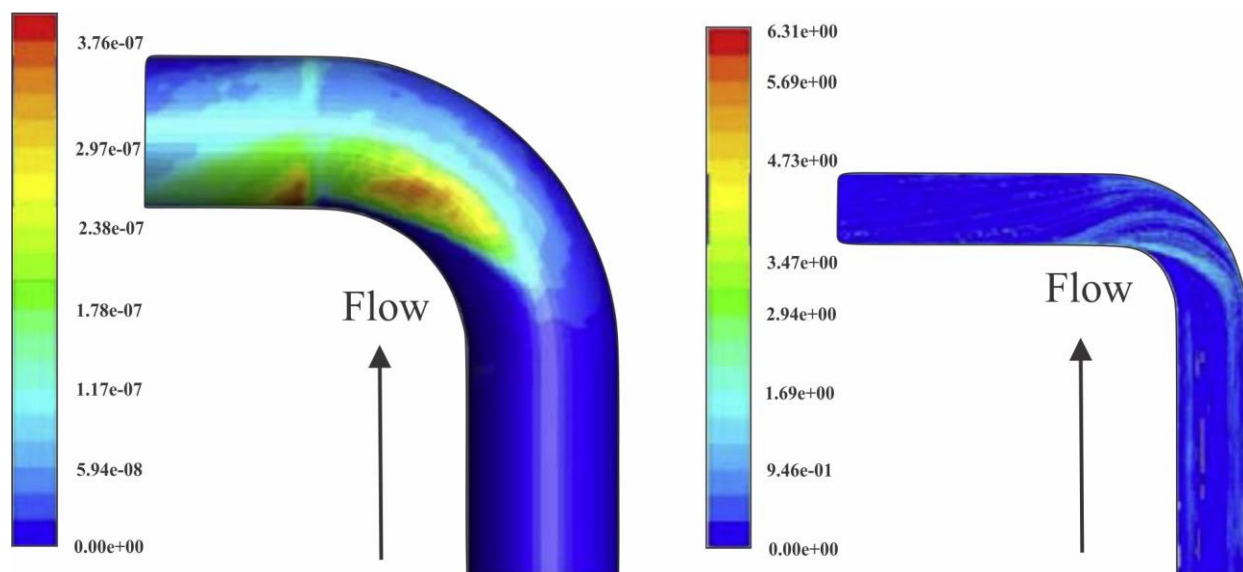
Nota: Extraído de Zhang et al, 2021

El diseño de sistemas de producción, procesamiento y separación requiere un alto criterio de ingeniería, especialmente porque el flujo multifásico que proviene de un pozo puede causar problemas en los equipos y tuberías que se encuentran río abajo. (Straw et al., 2021) presentaron los avances más recientes en el modelamiento multifásico para la mejora en el diseño y el desempeño de los sistemas de separación y proceso. Además, (Wee & Yap, 2019) desarrollaron estudios para concebir los patrones de erosión generados en líneas y codos bajo flujo continuo con partículas de arena de tamaño constante y variable. Este es un problema de gran relevancia, pues la arena que acarrean los fluidos producidos puede causar falla en las líneas de tubería, especialmente en los codos, lo que puede generar costos de reparación, o peor aún, consecuencias

ambientales significativas. En la figura 5 se puede apreciar el contorno de erosión obtenido en el codo de tubería y la trayectoria trazada por las partículas.

Figura 5.

Contorno de erosión y trayectoria de partículas de arena en un codo de tubería.



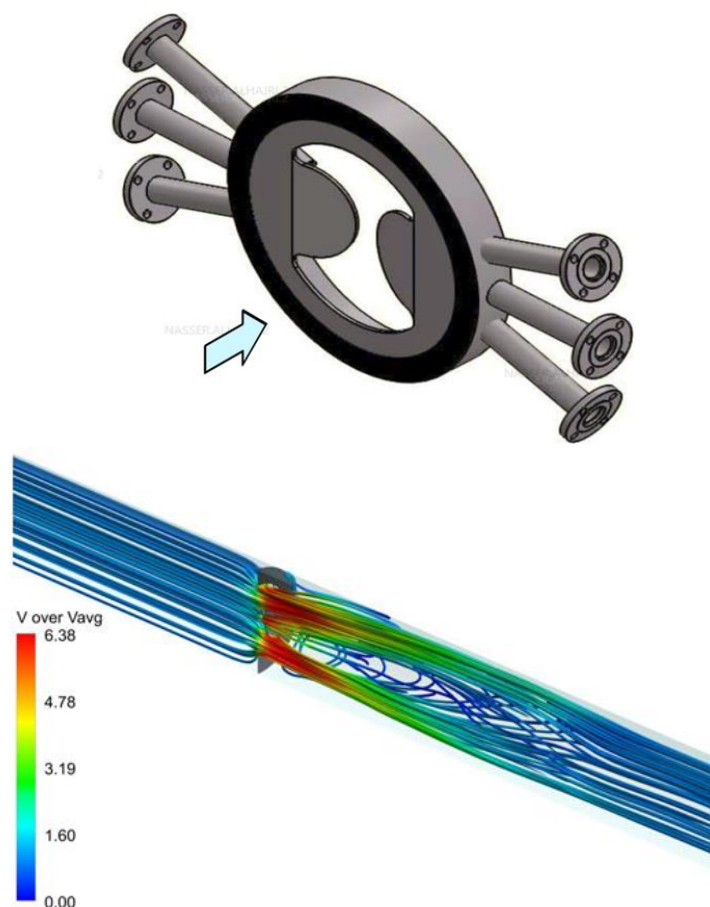
Nota: Extraído de Wee & Yap, 2019.

Son múltiples los estudios que se han realizado con CFD en relación con los mezcladores estáticos. Esta herramienta permite modelar el comportamiento inducido en el flujo por causa de los elementos internos y, a su vez, utilizar los resultados numéricos de diferentes variables para evaluar la eficiencia del proceso de mezclado como lo es el coeficiente de variación (CoV), la caída de presión y la eficiencia extensional. Además, el software comercial para CFD trae herramientas que posibilitan visualizar los perfiles de velocidad, concentración, densidad, entre otros, generados al terminar la simulación; esto favorece una mayor calidad en el análisis del comportamiento del flujo. (Alhajri et al., 2018) evalúan, a partir del modelado de CFD y pruebas en campo, un mezclador estático que fue instalado en la entrada de un tanque de desalado de crudo

en una planta de separación en Saudi Aramco. La tecnología consistía en un mezclador estático compacto tipo oblea, véase figura 6, el cual generaría un mezclado turbulento mejorado para incrementar la eficiencia del proceso de desalado. Se encontró que el mezclador estático generó una reducción del 17% en el consumo de agua de lavado manteniendo el contenido de sal dentro de los estándares que se venían manejando, con la posibilidad de incluso mejorar el rendimiento a través de una optimización de la ubicación del mezclador en la línea.

Figura 6.

Diseño y patrón de flujo generado por un mezclador estático tipo oblea.

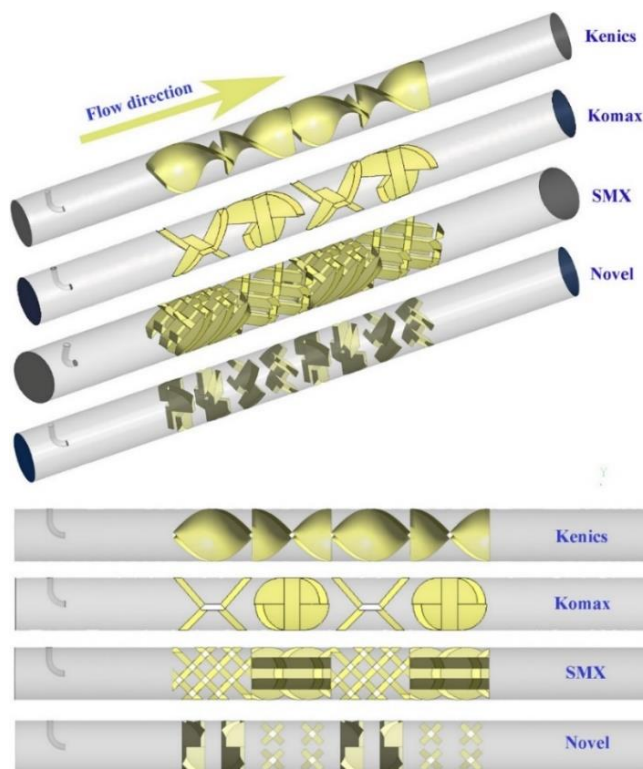


Nota: Extraído de Alhajri et al., 2018.

(Haddadi et al., 2020) realizaron un estudio comparativo de los resultados de mezcla y el desempeño de tres modelos de mezcladores estáticos comerciales (Kenics, Komax y SMX) con el de un nuevo diseño propuesto por los autores, en la figura 7 se pueden apreciar en detalle los modelos de los mezcladores usados para el estudio. El estudio se llevó a cabo con dos líquidos miscibles a diferentes valores de número de Reynolds. El criterio utilizado para comparar el resultado del nuevo mezclador con los modelos comerciales fue el consumo de energía (relacionado con la caída de presión) y la eficiencia de mezclado (mediante el coeficiente de variación). Los resultados obtenidos usando CFD se pueden observar en la figura 8, estos demostraron que el nuevo diseño de mezclador estático tuvo un mejor desempeño presentando una mejor eficiencia de mezclado y una caída de presión hasta 45% menor.

Figura 7.

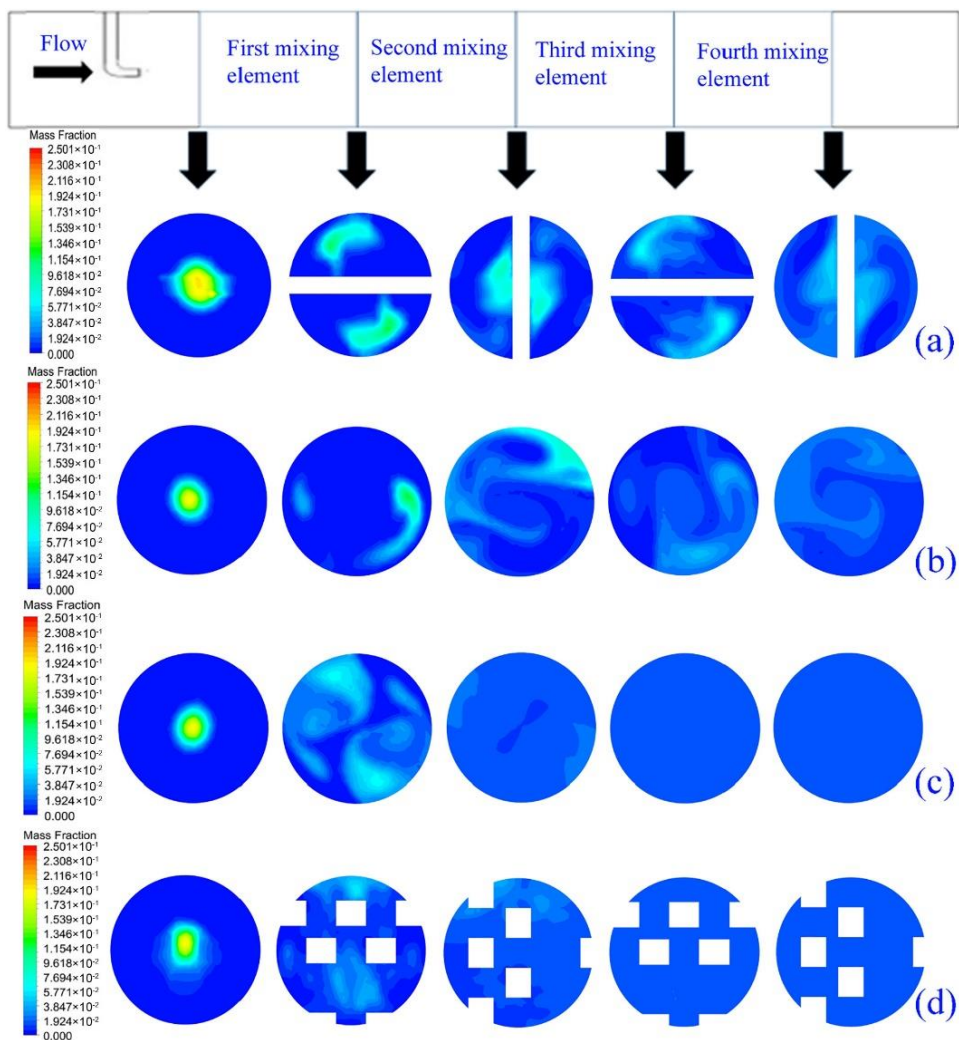
Modelos de mezcladores estáticos comerciales y modelo planteado Haddadi et al., 2020.



Nota: Extraído de Haddadi et al., 2020.

Figura 8.

Perfiles de concentración para cada diseño de mezclador estático obtenidos por Haddadi et al.



Nota: Extraído de Haddadi et al., 2020.

4. Metodología

La metodología trabajada se entiende como los procedimientos realizados para desarrollar la simulación. Esta es una secuencia lógica en la que se parte del planteamiento del problema, una vez establecido el objetivo se hace uso de técnicas de Dinámica Computacional de Fluidos. Primeramente, se define la geometría que se estudiará y se discretiza en una malla de simulación, la cual permitirá resolver las ecuaciones de flujo para todo el dominio computacional. Posteriormente se establecen las propiedades de los fluidos, los cuales poseen diferencias considerables en su densidad y viscosidad. También se establecen las condiciones de frontera, que son los valores de entrada para que el *software* lleve a cabo la simulación. Finalmente se da solución al problema mediante el modelo matemático planteado y, además, se lleva a cabo una prueba de independencia de malla con el fin de asegurar que los resultados son numéricamente independientes del mallado realizado.

4.1 Planteamiento del problema

El objetivo principal del presente trabajo es estudiar el desempeño de un mezclador estático comercial aplicado a un proceso de dilución de crudo con nafta. Con el alcance de este objetivo se pretende realizar un aporte significativo a la literatura acerca del rendimiento del modelo seleccionado, esto debido a que la mayoría de los mezcladores que se están utilizando actualmente en la industria *Oil & Gas* tienen entre 10 a 20 años y fueron realizados de manera empírica, mediante reglas del pulgar y experiencia de ingeniería.

4.2 Modelo físico

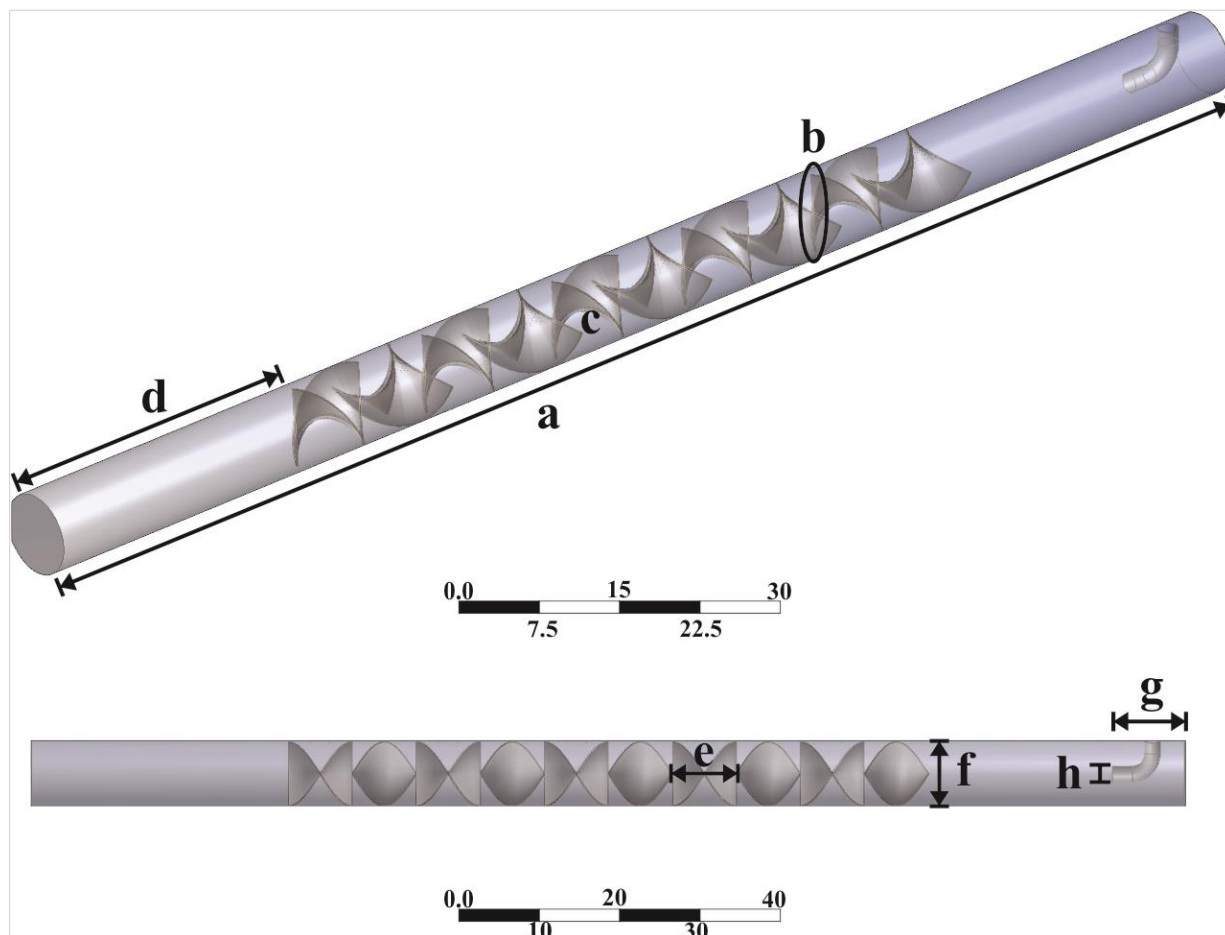
El primer paso para desarrollar el estudio es la elaboración del diseño del mezclador estático en una herramienta de Diseño Asistido por Ordenador, en este caso se hizo uso de la herramienta

Design Modeler CFD que provee *Ansys Workbench*. Para la selección del modelo se tuvo en cuenta las guías de selección encontradas en (“Handb. Ind. Mix.,” 2003) y (Thakur et al., 2003), donde se puede resaltar el modelo comercial KM de la línea de mezcladores estáticos *Kenics* de *Chemineer*, la cual es una propuesta interesante ya que promete alcanzar una eficiencia de mezclado suficiente para los estándares usados generalmente en la industria con una geometría en sus elementos internos relativamente simple. En la figura 9 se presenta el modelo base a seguir, para el cual se añadieron dos secciones de tuberías vacías antes y después de los elementos internos para permitir el desarrollo del flujo y evitar generar reflujos en las simulaciones. Cada elemento interno es un plano curvado en forma de hélice el cual va alternando su orientación de manera que su borde forme un ángulo de 90° con el borde del elemento siguiente. El crudo ingresa por la entrada principal de 8 in, mientras que la nafta es inyectada por una boquilla, la cual es una sección de tubería curva de diámetro 2 in alineada con el eje principal y ubicada a 9 in de la entrada principal.

El dominio computacional comprende la tubería horizontal con 10 elementos internos. En la tabla 6 se presentan los detalles geométricos del modelo de mezclador usado en el estudio. Se aprecia que la relación longitud-diámetro (L/D) del equipo es 16, teniendo en cuenta que los elementos internos tienen una longitud igual al diámetro del mezclador (8”), se puede decir que la longitud de cada una de las secciones de tubería vacía es la misma que ocuparían 4 elementos de mezclado. Es importante aclarar esto ya que más adelante, especialmente en el análisis de los resultados, se empleará el término L/D para referirse a diferentes ubicaciones a lo largo del mezclador.

Figura 9.

Geometría modelada en Ansys DesignModeler.

**Tabla 6.**

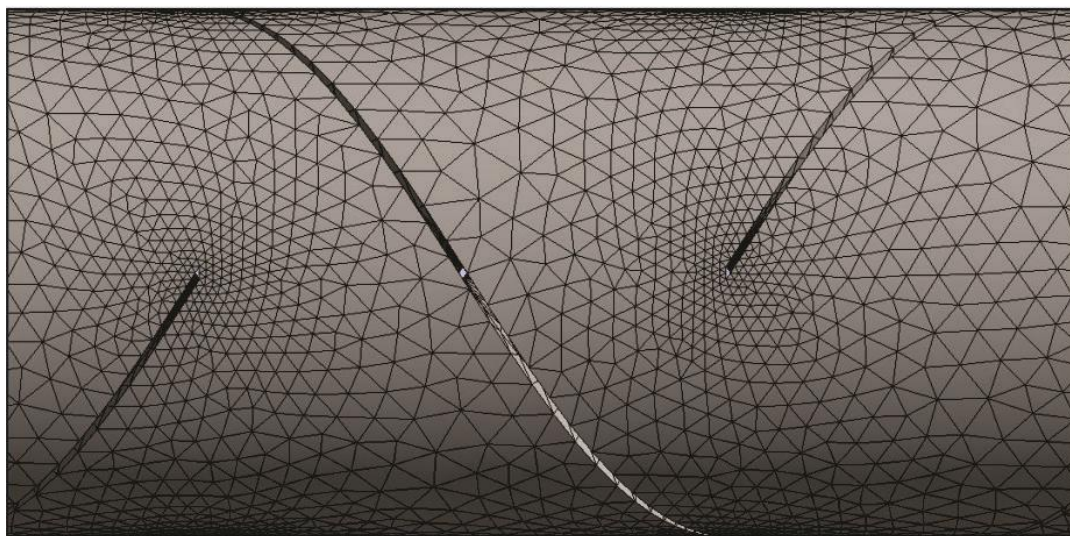
Datos geométricos del modelo de mezclador.

Ítem	Descripción	Medida
a	Longitud total de mezclador	144 in
b	Espesor de elementos internos	0.2 in
c	Cantidad de elementos internos	10
d	Sección de tubería vacía	32 in
e	Longitud de elementos internos	8 in
f	Diámetro de mezclador estático	8 in
g	Distancia entre entrada principal y boquilla	9 in
h	Diámetro de boquilla	2 in

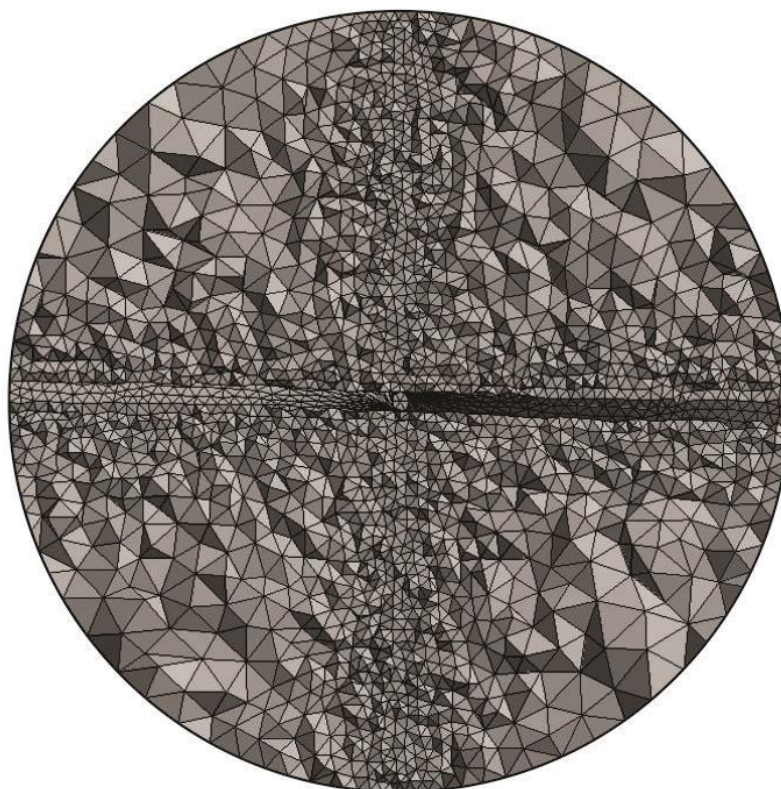
Figura 10.

(a) Vista lateral de malla tetraédrica construida. (b) Corte transversal de la malla generada.

a)



b)



4.3 Propiedades de los fluidos

Los fluidos requeridos para la simulación son un crudo pesado, de alta viscosidad, y nafta típica, la cual es inyectada de manera concéntrica por la boquilla. Las propiedades del crudo se muestran en la tabla 7, estas fueron extraídas indagando en la literatura (Moliere et al., 2009) y sus valores son los que usualmente presentaría un crudo pesado (Burgos & Casas, 2019). Es importante resaltar que este trabajo no se orienta como un caso de estudio para el crudo de un campo colombiano, más bien se centra en el estudio exclusivo del desempeño del mezclador y las conclusiones a las que se puede llegar a partir del análisis de los resultados de la simulación.

Tabla 7.

Propiedades de los fluidos usadas para la simulación.

Propiedad	Valor	Unidad
Crudo		
Gravedad API	13,5	°API
Densidad	972.8	Kg/m ³
Viscosidad dinámica (μ)	158704 @ 80 °F	cP
Flujo de entrada	15000	BPD
Velocidad	0,8511	m/s
Nafta		
Gravedad API	65	°API
Densidad	720	Kg/m ³
Viscosidad dinámica (μ)	1,04 @ 80 °F	cP
Flujo de entrada	1500	BPD
Velocidad	1,3618	m/s

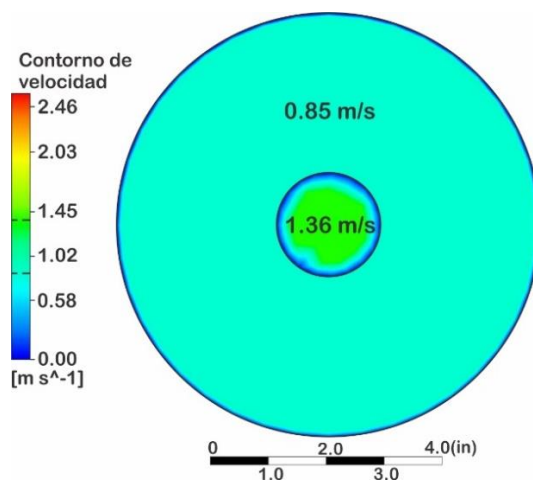
4.4 Condiciones de frontera

Como asunciones generales del modelo se tiene que el flujo se encuentra en una sola fase (líquida), los fluidos son incompresibles, el sistema es tridimensional, no hay transferencia de calor (isotérmico) y no existen reacciones en el dominio computacional (no hay producción ni consumo de masa). Además, los valores de viscosidad y densidad son calculados asumiendo que la mezcla de los fluidos es ideal e independiente de la fracción másica de los componentes.

La condición de frontera en la entrada del mezclador es un perfil de velocidad constante, el cual es definido por el caudal de crudo y nafta que es suministrado en sus respectivas entradas, en la figura 11 se pueden apreciar estos perfiles de velocidad. Además, se hace notorio que se eligió el caudal de nafta correspondiente al 10% de la tasa de flujo de crudo, esta relación de caudales es la establecida usualmente en las operaciones de dilución de crudo. Se establece la condición de no deslizamiento para la pared de la tubería y la superficie de los elementos internos del mezclador. La presión atmosférica, es decir, presión manométrica cero, es usada como condición de frontera a la salida del mezclador.

Figura 11.

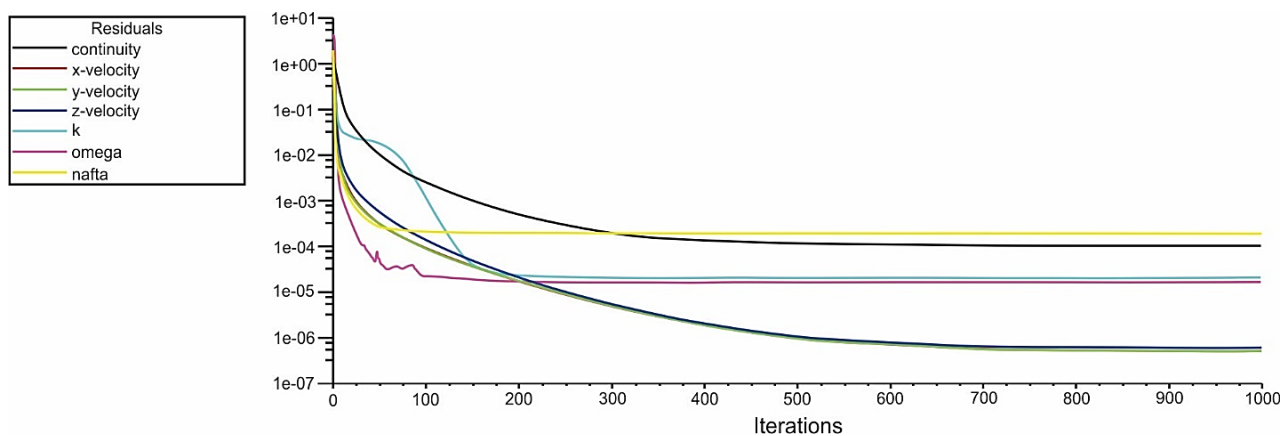
Condición de velocidad en la entrada principal y boquilla del mezclador.



Los residuales son una medida fundamental de la convergencia de una solución iterativa, pues cuantifican directamente el error en la solución del sistema de ecuaciones. Estos miden el desbalance de una variable conservada en cada volumen de control, esto es, la diferencia en el valor de una cantidad (por ejemplo, la velocidad en el eje x) entre dos iteraciones. Esto significa que mientras más bajos los residuales, menos cambiarán los resultados a medida que se continúa iterando: se alcanza una convergencia. Por lo general, en este tipo de simulaciones, los residuales del orden de 1×10^{-3} son suficientes e indican una buena convergencia, por esta razón, para efectos prácticos de este estudio y asegurar una buena exactitud, se establece un criterio de residuales por debajo de 1×10^{-3} , observando que llegan a tomar valores del orden de 1×10^{-4} y 1×10^{-5} . En la figura 12 se presentan los residuales generados en una de las simulaciones, estas curvas representan el comportamiento típico de estos valores en todas las simulaciones realizadas en la prueba de independencia de malla.

Figura 12.

Comportamiento de residuales hasta llegar a la convergencia.



Nota: el comportamiento horizontal (invariante) de las curvas de residuales después de la iteración 800 indica la convergencia de los resultados.

4.5 Modelo matemático

Las ecuaciones de continuidad, cantidad de movimiento y transporte de especies (modelo usado para simular el mezclado de los dos componentes) son solucionadas por el método de volúmenes finitos. Estas ecuaciones pueden ser expresadas como sigue:

$$\nabla \cdot (\rho V) = 0 \quad (1)$$

$$\nabla \cdot (\rho VV) = -\nabla P + \nabla \cdot [\mu \nabla V] + \rho g \quad (2)$$

$$\nabla \cdot (\rho V Y_A) = \nabla \cdot (\rho D_{AB} \nabla Y_A) \quad (3)$$

Donde,

μ : viscosidad dinámica aparente.

ρ : densidad aparente.

g : vector de aceleración gravitacional.

V : vector de velocidad media.

P : presión.

Y_A : fracción másica del componente A.

D_{AB} : Difusividad molecular.

Se seleccionó el algoritmo SIMPLE para el acoplamiento de presión-velocidad. Este algoritmo utiliza una relación entre las correcciones de velocidad y presión para imponer la conservación de la masa y obtener el campo de presión.

Si al resolver la ecuación de momento con un campo de presión supuesto P^* , el flujo de cara resultante J_{f}^* calculado

$$J_{f}^* = \hat{J}_{f}^* + d_f (P_{c0}^* - P_{c1}^*) \quad (4)$$

no satisface la ecuación de continuidad. Consecuentemente, se agrega una corrección J'_f al flujo de la cara J_{f}^* , de manera que el flujo corregido J_f

$$J_f = J_{f}^* + J'_f \quad (5)$$

satisface la ecuación de continuidad. El algoritmo SIMPLE postula que J'_f es escrito como

$$J'_f = d_f(P'_{c0} - P'_{c1}) \quad (5)$$

donde P' es la corrección de presión en la celda.

El modelo de turbulencia usado corresponde al modelo *Shear Stress Transport* $k-\omega$. Este fue desarrollado por (Menter, 1994) para combinar de manera efectiva la formulación robusta y precisa del modelo $k-\omega$ en las regiones cercanas a la pared con la independencia de flujo libre del modelo $k-\epsilon$ en regiones centrales. La combinación de estos modelos incluye los siguientes refinamientos:

- El modelo $k-\omega$ estándar y el modelo $k-\epsilon$ transformado se combinan por medio de una función. Esta está diseñada para tomar el valor de uno en regiones cercanas a la pared, activando el modelo $k-\omega$, y cero lejos de la pared, activando el modelo $k-\epsilon$ transformado.
- La definición de la viscosidad turbulenta se modifica para tener en cuenta el transporte de la tasa de deformación turbulenta.

4.6 Prueba de independencia de malla

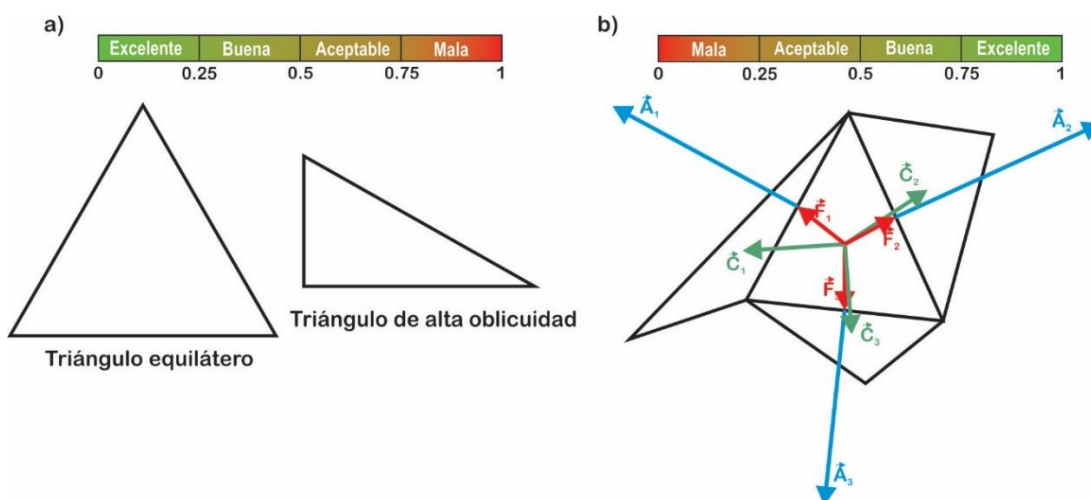
Para dar una solución al problema por medio de volúmenes finitos se plantea la división o enmallado de la geometría en volúmenes más pequeños donde se dará solución al sistema de ecuaciones. Este enmallado, dependiendo de su calidad y el número de divisiones, puede influir en los resultados de la simulación, por lo que se hace necesario el desarrollo de una prueba de independencia o de sensibilidad de malla para determinar el tamaño óptimo de la misma.

En este estudio se aseguró que todos los enmallados generados presentaran una calidad de malla aceptable después de cada refinamiento, para esto se monitorearon dos parámetros que están estrechamente relacionados con el grado de calidad de la malla: la oblicuidad y la ortogonalidad.

Oblicuidad. En el caso de una malla tetraédrica como la utilizada en este trabajo, la oblicuidad (*skewness*) indica qué tan lejos se encuentran las caras de los volúmenes de asemejarse a un triángulo equilátero perfecto, esto es esquematizado en la figura 13.a. Los valores de oblicuidad van desde cero a uno, donde los valores cercanos a cero indican buena calidad de la malla. El criterio aceptable de oblicuidad para este estudio se fijó por debajo de 0,75 ya que, si el grado de desviación es considerable, el *software* presenta problemas para llegar a una convergencia. En la figura 14 se reporta la distribución de los valores de oblicuidad y ortogonalidad que presentaron los volúmenes de las mallas realizadas.

Figura 13..

Criterios de calidad de malla. a) Oblicuidad. b) Ortogonalidad.

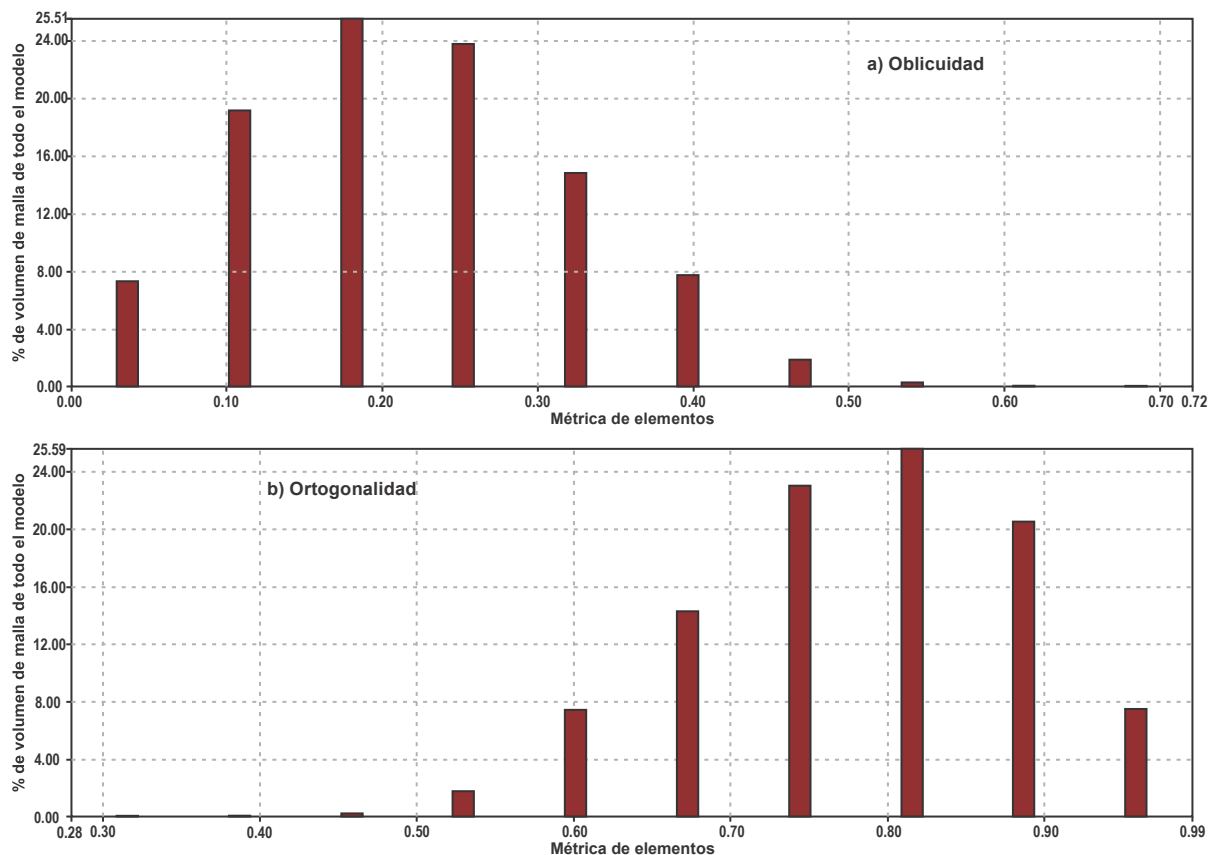


Ortogonalidad. Al igual que la oblicuidad, la ortogonalidad es un parámetro usado para determinar la calidad de la malla. La calidad ortogonal se calcula con mecánica vectorial. Los cálculos son realizados usando el vector normal a la cara, el vector del centroide de la celda al centroide de cada una de las celdas adyacentes, y el vector del centroide de la celda a cada una de sus caras; en la figura 13.b se muestran estos componentes. Los valores de ortogonalidad varían entre cero y uno, en este caso los valores cercanos a uno indican una buena calidad de enmallado. Para el estudio se fijó como criterio de calidad los valores de ortogonalidad por encima de 0,3.

En la figura 14 se presenta la manera en que se encuentran distribuidos los volúmenes, o elementos, que conforman una malla de 1'093.612 divisiones teniendo en cuenta los parámetros de (a) oblicuidad y (b) ortogonalidad. El eje de las ordenadas corresponde al porcentaje de elementos, del total de la malla, que se encuentran dentro del valor de oblicuidad/ortogonalidad correspondiente en el eje de las abscisas. Este tipo de gráficas permiten realizar conclusiones acerca de la calidad de la malla con un mejor nivel de detalle. En este caso se puede concluir que aproximadamente el 99 % de los volúmenes de la malla se encuentran por debajo de 0,5 en oblicuidad y por encima de 0,5 en ortogonalidad; el 1 % restante en cada gráfica sigue encontrándose dentro de los límites establecidos como aceptables para el estudio.

Figura 14.

Distribución de calidad de volúmenes de malla. (a) oblicuidad (b) ortogonalidad.



Un objetivo importante durante la elaboración de este trabajo fue garantizar que todos los enmallados realizados para la prueba de independencia de malla presentaran una calidad similar a la que se aprecia en la figura 14, la cual es necesaria para obtener la convergencia deseada y la fiabilidad de que los resultados finales no están siendo alterados por deficiencias en la malla.

En las tablas 8 y 9 se resumen las mallas que se construyeron durante la prueba, sus parámetros de calidad y distribución de elementos correspondiente. La distribución se realiza teniendo en

cuenta los parámetros de oblicuidad y ortogonalidad establecidos. Cada fila principal corresponde a una malla y se subdivide en dos filas; la superior presenta el valor mínimo, máximo y promedio obtenido, mientras que la inferior presenta el porcentaje de elementos de la malla que se encuentran dentro de los rangos descritos en el encabezado de cada tabla.

Tabla 8.

Reporte de oblicuidad de las mallas trabajadas.

<i>Malla</i> <i># Elementos</i>	Oblicuidad			
	Min	Máx	Prom	Desv. est
	0,0 – 0,2	0,2 – 0,4	0,4 – 0,6	0,6 – 0,75
<i>Malla 1</i> <i>95.534</i>	6,285x10 ⁻⁴ 53,73 %	0,750 37,00 %	0,225 9,03 %	0,112 0,24 %
<i>Malla 2</i> <i>149.972</i>	2,409x10 ⁻⁴ 53,94 %	0,750 37,40 %	0,227 8,60 %	0,108 0,06 %
<i>Malla 3</i> <i>328.564</i>	5,509x10 ⁻⁴ 53,27 %	0,697 37,60 %	0,237 9,10 %	0,110 0,03 %
<i>Malla 4</i> <i>524.457</i>	5,220x10 ⁻⁵ 54,34 %	0,750 37,70 %	0,230 7,86 %	0,109 0,10 %
<i>Malla 5</i> <i>809.737</i>	9,157x10 ⁻⁵ 57,51 %	0,7476 33,68 %	0,221 8,80 %	0,107 0,01 %
<i>Malla 6</i> <i>1'093.612</i>	4,092x10 ⁻⁵ 51,86 %	0,720 46,08 %	0,222 2,031 %	0,102 0,03 %
<i>Malla 7</i> <i>2'238.597</i>	2.104x10 ⁻⁴ 55,14 %	0,739 37,20 %	0,220 7,54 %	0,101 0,04 %

Tabla 9.

Reporte de ortogonalidad de las mallas trabajadas.

Ortogonalidad				
<i>Malla</i>	Min	Máx	Prom	Desv. est
<i># Elementos</i>	0,25 – 0,4	0,4 – 0,6	0,6 – 0,8	0,8 – 1,0
<i>Malla 1</i>	0,250	0,990	0,774	0,110
<i>95534</i>	0,21 %	7,23 %	34,50 %	58,06 %
<i>Malla 2</i>	0,250	0,990	0,771	0,106
<i>149972</i>	0,02 %	7,90 %	35,49 %	56,59 %
<i>Malla 3</i>	0,302	0,989	0,761	0,108
<i>328564</i>	0,10 %	8,417 %	35,80 %	55,68 %
<i>Malla 4</i>	0,250	0,993	0,768	0,107
<i>524457</i>	0,01 %	7,17 %	35,90 %	56,92 %
<i>Malla 5</i>	0,252	0,991	0,777	0,106
<i>809737</i>	0,14 %	8,28 %	32,14 %	59,44 %
<i>Malla 6</i>	0,279	0,994	0,776	0,101
<i>1'093612</i>	0,06 %	1,87 %	44,56 %	53,51 %
<i>Malla 7</i>	0,261	0,995	0,779	0,099
<i>2'238.597</i>	0,13 %	7,35 %	36,10 %	56,42 %

Una vez evidenciada la apropiada calidad de las mallas, los resultados de la prueba de independencia de malla son plasmados en la tabla 10. El parámetro monitoreado durante esta prueba fue el coeficiente de variación (CoV) relacionado con la dispersión relativa de la concentración de nafta en un plano ubicado flujo abajo al final del cuarto elemento de mezclado, en $Z = 32$ in a partir del inicio de la zona de mezcla. La tabla 10 resume las características claves

de las mallas, también nos permite evidenciar que el tiempo de simulación es directamente proporcional al nivel de refinamiento de la malla.

Tabla 10.

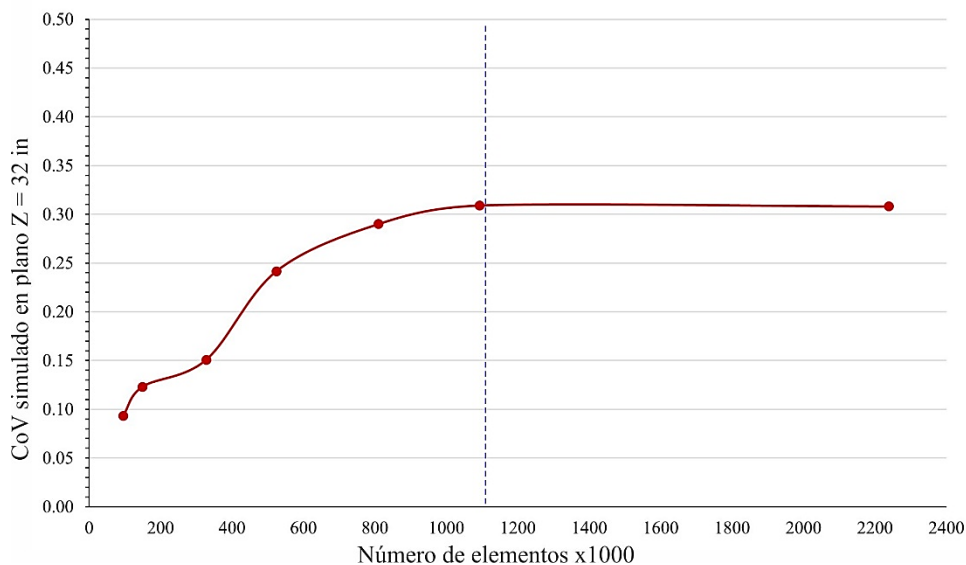
Tiempo simulado y CoV estimado para cada enmallado.

Malla	1	2	3	4	5	6	7
<i>Número de elementos</i>	95.534	149.972	328.564	524.457	809.737	1'093.612	2'238.597
<i>Número de nodos</i>	19.871	31.145	66.567	103.382	197.422	210.761	298.168
<i>Tiempo simulado (min)</i>	110	180	340	780	1.310	1.680	2.640
<i>CoV simulado</i>	0,093	0,123	0,150	0,241	0,289	0,309	0,306

Como se muestra en la tabla, el valor del CoV simulado incrementa a medida que incrementa el refinamiento de la malla, hasta llegar a la malla 7 en la cual el valor simulado cambia menos del 0,8 % con respecto al valor obtenido en la malla anterior. Este comportamiento se puede apreciar mejor de manera gráfica en la figura 15. De esta manera se puede concluir que el nivel de refinamiento correspondiente a la malla 6 nos provee el balance entre precisión numérica de los resultados y bajo tiempo computacional para este caso.

Figura 15.

Prueba de independencia de malla. Valores simulados de CoV en el punto Z=32 in.



5. Resultados y análisis

Con el objetivo de caracterizar de manera integral el mezclador simulado, se desarrolla un análisis cualitativo y cuantitativo de los resultados. Para esto se dispone de herramientas de post procesamiento que permiten visualizar y comparar las variables de interés (velocidad, fracción másica de nafta, coeficiente de variación, presión y eficiencia extensional) por medio de contornos, gráficos de distribución, entre otros.

5.1 Perfiles de velocidad

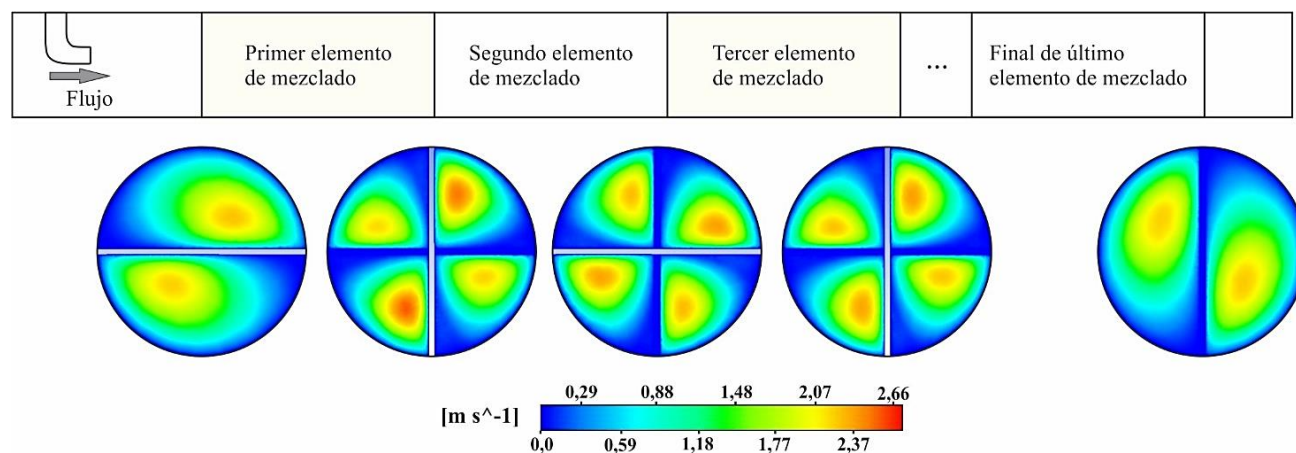
Al analizar los perfiles de velocidad resultantes de la simulación se busca entender el funcionamiento de los elementos internos y cómo su geometría específica genera un campo de

velocidades que favorece el mezclado de los componentes. En la figura 16 se pueden apreciar múltiples contornos, transversales a la dirección del flujo, del campo de velocidades a lo largo de toda la geometría del mezclador en diferentes puntos. Se plantea de manera esquemática la ubicación de cada contorno de velocidad para mayor aclaración de la zona de la cual se obtuvo.

La figura 16 muestra con claridad los rangos de velocidad que alcanza el flujo al pasar a través de los elementos de mezclado. Se puede observar que al ingresar a la zona de mezclado el flujo es dividido en dos partes, donde cada una es dirigida de manera helicoidal a lo largo del elemento de mezclado, lo que hace que alcance velocidades de alrededor de 2,4 m/s favoreciendo la turbulencia y, consecuentemente, el mezclado de los componentes.

Figura 16.

Contornos de velocidad transversales obtenidos.



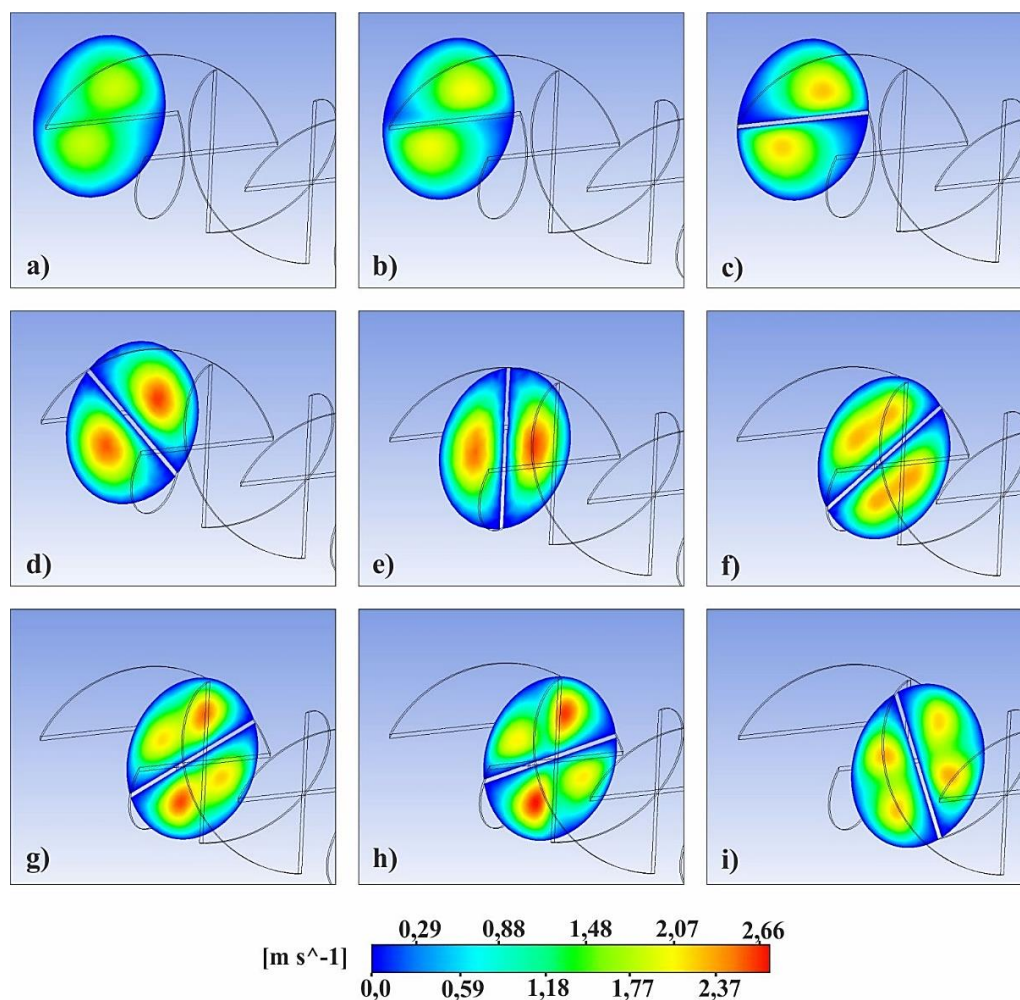
Además, se hace evidente la formación de cuatro zonas de velocidad al final del primer elemento y, a medida que el flujo avanza a través del mezclador, estas zonas se combinan y crean nuevas zonas con diferentes velocidades. Para profundizar con mayor detalle el cómo se forman estas zonas de velocidad se plantea la figura 17, la cual consta de una secuencia de contornos

específica alrededor del primer elemento de mezcla. A partir de esta figura se puede describir paso a paso del comportamiento del flujo y las velocidades que presenta:

Después de desarrollarse en la sección de tubería vacía, el flujo se encuentra con el inicio del primer elemento de mezcla y empieza a dividirse en dos flujos iguales (a); después de este punto, y a medida que son redirigidos por el elemento de mezclado, sus velocidades incrementan gradualmente debido a la rotación que se impone sobre el fluido (b y c) hasta que se alcanzan las velocidades máximas en ambas corrientes (d y e).

Figura 17.

Secuencia detallada de la formación de zonas de velocidad en la geometría interna del mezclador.



En este punto es importante resaltar que los elementos de mezclado se encuentran alternados de manera que cada borde final esté a 90° del borde inicial del siguiente elemento. Por esta razón cuando se observa (f) se puede apreciar que cada una de las dos corrientes que se formaron en el primer elemento son ahora divididas transversalmente, generando así cuatro zonas de velocidad (g y h), las cuales posteriormente, a medida que avancen a través del segundo elemento de mezclado, se unificarán de nuevo en dos zonas de velocidad correspondientes a las dos corrientes formadas por este elemento, como indica (i).

Este análisis permite inferir que el mecanismo de trabajo del mezclador KM se basa en la división y rotación alternada de la corriente de fluido a lo largo de todo el cuerpo del mezclador. De esta manera se genera un perfil de velocidad que está cambiando constantemente, favoreciendo así un mejor mezclado de los componentes.

5.2 Distribución de la concentración

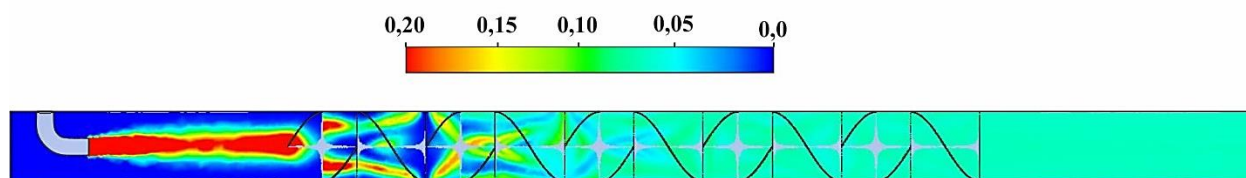
Una vez analizada la dinámica que impone el mezclador a los fluidos, se puede estudiar la calidad del mezclado obtenido. Para esta sección se realizaron contornos que muestran la manera en que se distribuye la concentración de nafta en diferentes planos transversales a lo largo del mezclador. Este parámetro de análisis se obtiene extrayendo los valores de fracción másica de nafta en el *software* de post procesamiento. Con esto se pretende realizar un análisis cualitativo del comportamiento de los componentes y de la eficiencia de mezclado que presentó el mezclador en la simulación.

En la figura 18 se observa la distribución de la fracción másica de nafta en un corte vertical que cubre todo el recorrido del fluido. En este se hace gráfica la manera en que se diseñó la entrada de

la nafta a través de la boquilla. Además, se muestra la manera en que se va alcanzando la homogeneización de la mezcla a medida que la corriente atraviesa toda la zona de mezcla; se aprecia que el mayor cambio en la distribución de la concentración de nafta ocurre en los primeros cinco elementos internos.

Figura 18.

Plano lateral de la fracción másica de nafta a través de toda la geometría.



La figura 19 presenta la distribución de la concentración de nafta en los planos situados a $L/D=4$, $L/D=6$, $L/D=8$, $L/D=10$, $L/D=12$, $L/D=14$. Estas ubicaciones corresponden al plano que se encuentra justo antes de ingresar al primer elemento de mezclado (a), los planos ubicados al final de los elementos de mezclado 2 (b), 4 (c), 6 (d), 8 (e), y el plano que se encuentra después del último elemento (f).

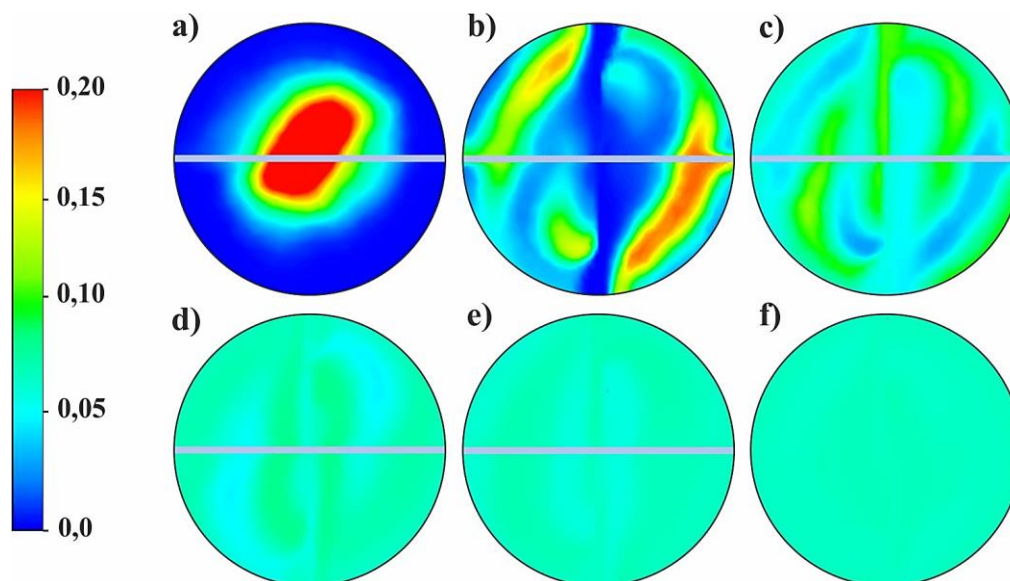
Se hace evidente que a medida que el flujo pasa por la geometría interna, se genera una mayor homogeneización de la mezcla. Como se indicó en la sección 4.1, esto se debe a que el plano rotado en forma de hélice divide la corriente en dos y les imprime velocidad, para que luego sean divididas de nuevo en el siguiente elemento interno, pero esta vez de forma perpendicular, haciendo que se genere el movimiento caótico que favorece el mezclado.

La figura 19.b indica que después de pasar por los dos primeros elementos de mezclado aún no se ha generado un mezclado muy representativo, pues siguen existiendo zonas donde la fracción de nafta es cero y otras donde es alrededor de 0,2. Esta mala distribución de la concentración de

nafta cambia una vez el fluido llega al final del elemento de mezclado 4, figura 19.c, para este punto se logra observar un progreso en el mezclado con una distribución de nafta más homogénea, la cual ya no presenta puntos de muy alta concentración.

Figura 19.

Fracción másica de nafta en los planos $L/D= 4, 6, 8, 10, 12, 14$.



La figura 19.d, que se ubica al final del sexto elemento de mezclado, muestra una mejor distribución de la fracción másica, oscilando entre valores de 0,05 y 0,1. A partir del punto 19.e la variación en la concentración es bastante baja, llegando ser casi imperceptible a la vista a la salida de la zona de mezclado (19.f).

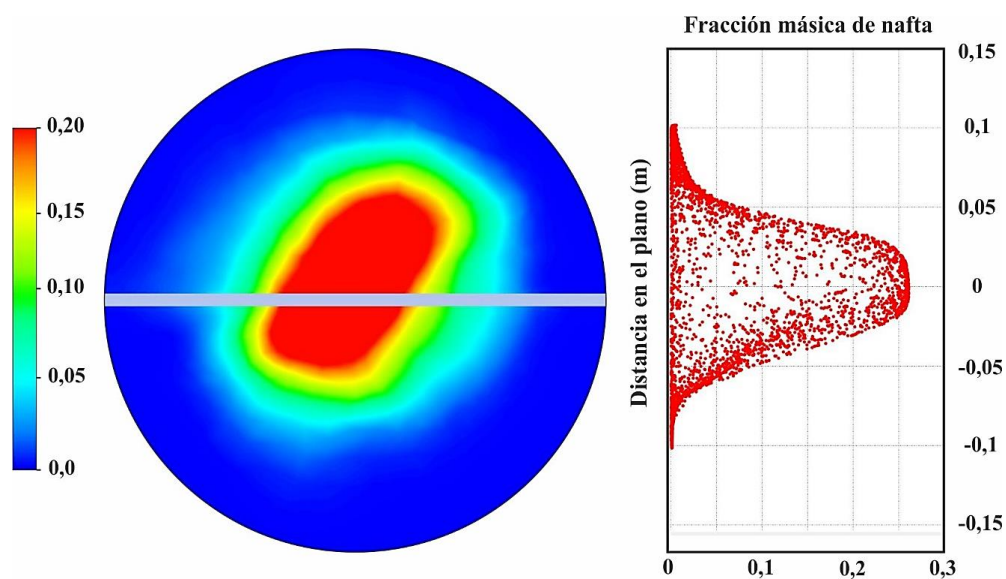
Para fines de operaciones industriales, como lo es la dilución de crudo, es importante alcanzar una distribución de concentración como la observada en la figura 20.f. Esto asegura que el equipo que está logrando una buena integración de los componentes y que la corriente de salida es lo suficientemente homogénea.

5.3 Coeficiente de variación

El coeficiente de variación es una medida de dispersión estadística, que en este caso, sirve como herramienta para determinar el grado de eficiencia de mezclado del equipo simulado (Jalilibal et al., 2021). El CoV se calcula a partir de la media aritmética de una serie de datos y su desviación estándar. Para determinar este parámetro, se extrajeron los datos de distribución másica de nafta, como el que se aprecia en la figura 20, en las secciones de interés y se procesaron los datos. El valor que se reporta como coeficiente de variación final alcanzado por el mezclador, es aquel que obtenido al final de la geometría después de que la corriente de fluido ha atravesado la zona de mezclado en su totalidad.

Figura 20.

Contorno de fracción másica $L/D=4$ representado como distribución en un plano cartesiano.

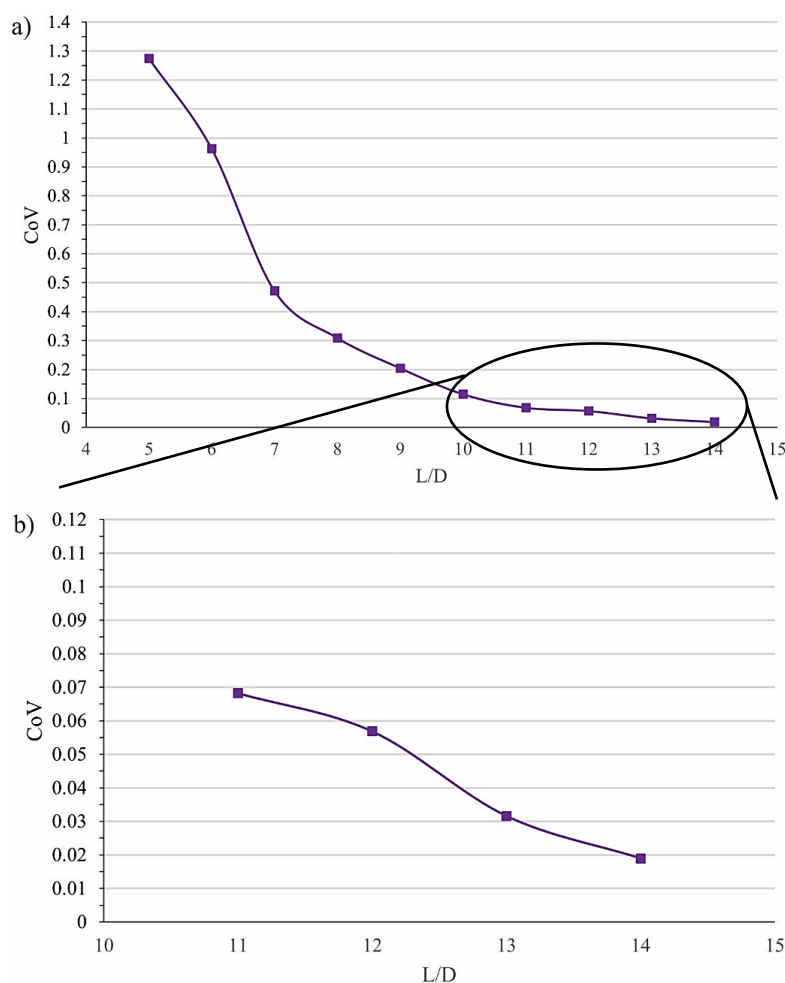


La figura 21.a presenta la relación entre el coeficiente de variación y la longitud del mezclador estático; se aclara que los valores de L/D de 5 a 14 se ubican al final de cada elemento de mezclado desde el primero al décimo respectivamente. De esta gráfica es evidente que, al incrementar la

longitud del mezclador estático junto con el número de elementos de mezclado que atraviesa el flujo, el valor del CoV decrece gradualmente. Este comportamiento para el mezclador KM de *Chemineer* es muy similar al registrado por (Haddadi et al., 2020) en los primeros elementos de mezclado. Además, la figura 21.b permite visualizar con más detalle los valores de CoV registrados al final de la zona de mezclado. En esta se aprecia un CoV de 0,018 al final del último elemento de mezclado, siendo este el valor adoptado para determinar la eficiencia de mezclado, la cual se aproxima al 98 %.

Figura 21.

Comportamiento de CoV en diferentes puntos a lo largo del mezclador: (a) general (b) en detalle.



Como se verá más adelante en las conclusiones, el hecho de configurar 10 elementos de mezclado a lo largo de la geometría permite alcanzar valores bajos de coeficiente de variación, lo que se traduce en un buen mezclado de los componentes. En un caso real de ingeniería, este sobredimensionamiento no resulta realmente necesario, pues puede generar incrementos de costos de materiales y de energía adicional requerida para bombear los fluidos a través del equipo.

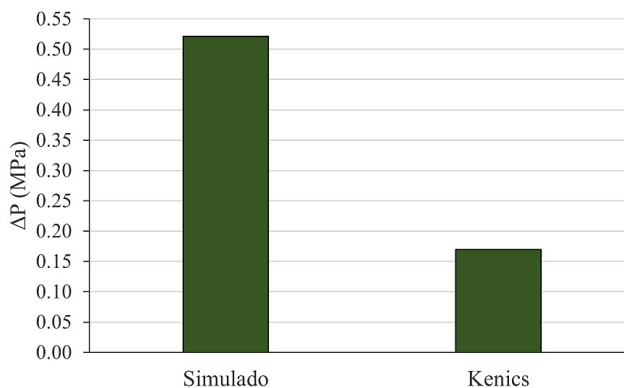
5.4 Caída de presión

Según (Jiang et al., 2021) la predicción de la caída de presión en el mezclador es esencial para conocer el requerimiento de energía y así poder dimensionar el sistema de bombeo que alimentará la entrada del mezclador estático. Para realizar este análisis se calcula la caída de presión como la diferencia absoluta entre la presión promedio de los planos ubicados a $L/D=2$ y $L/D=16$; estas ubicaciones corresponden exactamente al punto medio de las zonas de desarrollo de flujo (es decir, las secciones de tubería vacía) que se encuentran antes y después de la zona de mezclado.

La figura 22 relaciona el valor de la caída de presión generada y permite comparar este resultado con el obtenido por (Jiang et al., 2021) para el mismo diseño comercial de mezclador estático. Se observa que la caída de presión es alta en comparación; esto es un resultado lógico teniendo en cuenta que la configuración del mezclador en este estudio posee una cantidad significativa de elementos internos (10) en comparación, además se trabajó con un caudal considerable de fluido de alta viscosidad. Sin embargo, en las conclusiones se tocará este tema, sugiriendo la posibilidad de reducir la longitud del mezclador para disminuir la energía de bombeo requerida.

Figura 22.

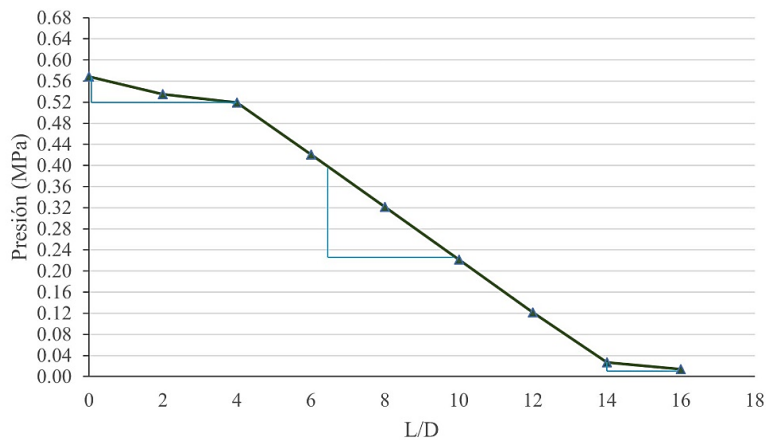
Comparación caída de presión con resultados obtenidos por Jiang et al.



La figura 23 presenta los valores de presión obtenidos a diferentes longitudes del mezclador estático. En esta se puede distinguir una tendencia, la cual es resaltada por las líneas punteadas azules. En las secciones de tubería vacía que se encuentran al inicio y al final del mezclador ($L/D=0-4$ y $L/D=14-16$), la pendiente no es tan pronunciada como en la zona de mezclado; esto se debe al consumo de energía de bombeo que es realizado por los elementos internos para ocasionar la turbulencia responsable del buen mezclado de los componentes. De esta figura se puede obtener que la caída de presión generada por elemento de mezclado se aproxima a 0,05 MPa.

Figura 23.

Valores de presión promedio vs longitud del mezclador.

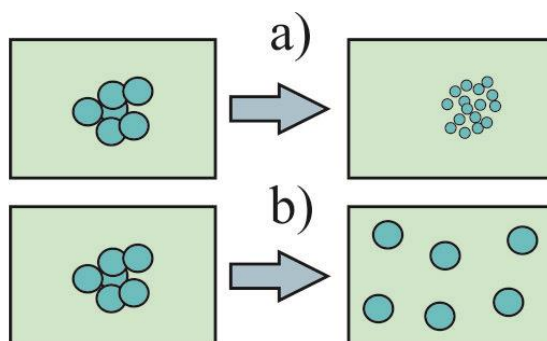


5.5 Eficiencia extensional

Los resultados más importantes a monitorear durante este estudio son los perfiles de velocidad, la distribución de la concentración de nafta, el coeficiente de variación y la caída de presión. Además de estas variables, se introduce la eficiencia extensional α en aras de darle un poco más de integridad y profundidad al estudio. Mientras que el CoV caracteriza la eficiencia de mezclado, siendo el parámetro más importante relacionando la distribución de la nafta en el mezclador; la eficiencia extensional aporta una idea del mezclado dispersivo, ver figura 24.

Figura 24.

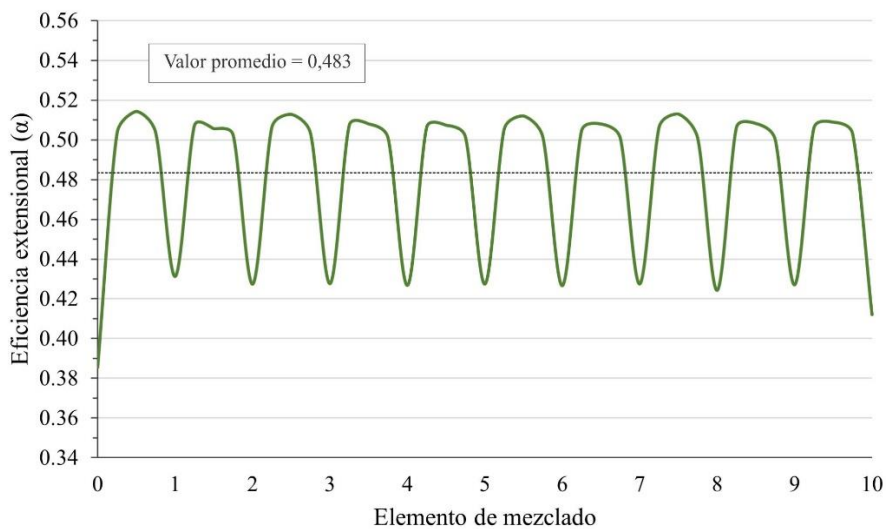
Distinción gráfica entre (a) mezclado dispersivo y (b) mezclado distributivo.



La figura 25 grafica los valores de eficiencia extensional obtenidos a lo largo de los elementos internos de mezclado. El comportamiento exhibido es muy similar al presentado por (Meng et al., 2014) para un diseño de mezclador *Kenics* semejante al evaluado en este estudio. Además, al igual que en ese estudio y el realizado por (Haddadi et al., 2020), el valor promedio de la eficiencia extensional se ubica alrededor de 0,5, siendo 0,52 para el primero y 0,53 para el segundo.

Figura 25.

Eficiencia extensional a lo largo de la zona de mezclado.



Los valores de $\alpha = 0$ es el correspondiente a pura rotación, $\alpha = 0,5$ corresponde a deformación simple, como la que se genera en una tubería con algo de turbulencia, y $\alpha = 1$ a pura extensión (Heniche et al., 2005). En base a esto se puede interpretar que a lo largo de la zona de mezclado tiende a predominar la rotación del flujo y en el cuerpo de los elementos se tiende a alcanzar cierto grado de mezclado dispersivo.

6. Conclusiones

Con los resultados presentados en este estudio, se puede concluir que los mezcladores estáticos son equipos de gran relevancia en los procesos de tratamiento de crudo pesado, especialmente para su dilución. Evidencia de esto, se tiene una alta eficiencia de mezclado, la cual es el indicativo del alto grado de homogeneización de la mezcla que se puede alcanzar en estos dispositivos. Además, se refuerza la valía de los aportes que la Dinámica de Fluidos Computacional puede generar en nuestra industria de los hidrocarburos.

En el capítulo 4 se realiza el análisis de perfiles de velocidad, distribución de concentración de nafta, coeficiente de variación, caída de presión y eficiencia extensional; esto se hace con el objetivo de generar conclusiones acerca de (a) el rendimiento *per se* del mezclador estático para el proceso de mezcla independientemente de otros factores, y (b) la aplicabilidad de la geometría planteada en una operación industrial real, junto con las ventajas o limitantes que pueda ofrecer.

(a) En el capítulo 3 se plantea el modelo geométrico evaluado en el estudio, el cual es un mezclador estático comercial de la línea *KM* de *Chemineer*, y también se establecen las propiedades de los fluidos que serán mezclados (crudo pesado y nafta para dilución); además, las condiciones de caudal de 15.000 Bbl de crudo diario para la operación. En el análisis de los perfiles de velocidad se observó que la división y rotación generada por la geometría interna de este modelo induce en la corriente de fluido un alto grado de turbulencia, causando cambios en las velocidades percibidas por el fluido constantemente. El resultado de este comportamiento puede apreciarse detalladamente en el análisis que se realizó a los contornos de fracción másica obtenidos en la sección 4.2 y el CoV de la sección 4.3. Allí se puede percibir que la interacción de la corriente de

flujo con los primeros cuatro elementos de mezclado genera una buena distribución inicial de la nafta en el crudo. Esto permite concluir que el modelo comercial planteado puede generar un alto grado de homogeneización en las operaciones de mezclado en general.

Además, el resultado observado en la eficiencia extensional permite concluir que la característica distintiva de este diseño de mezclador es la rotación que imponen sus elementos internos. Siendo este mecanismo, junto con la división continua de la corriente de fluido, el accionar responsable de los resultados de mezclado observados.

(b) Como se mencionó en la sección 4.4, los resultados obtenidos de caída de presión sugieren que para términos prácticos se debería considerar una reducción en el dimensionamiento del mezclador estático. Esto debido a que para una aplicación industrial real no conviene generar una caída de presión tan alta, pues el diseño del sistema de bombeo sería demasiado exigente en temas de recursos. Además, en la sección 4.3 se observa que se puede alcanzar un CoV de aproximadamente 0,05 (eficiencia de mezclado de 95%) en el punto $L/D = 12$, esto es, al final del octavo elemento de mezclado. Por lo que una reducción hipotética del dimensionamiento para tener de seis a ocho elementos internos podría alcanzar eficiencias de mezclado bastante aceptables en muchas aplicaciones industriales.

7. Sugerencia para trabajos futuros

El área de la simulación se caracteriza por la posibilidad de variar múltiples parámetros para predecir y estudiar el comportamiento de los fenómenos simulados a diferentes condiciones. Esta característica permite que las investigaciones realizadas en el área de Dinámica de Fluidos

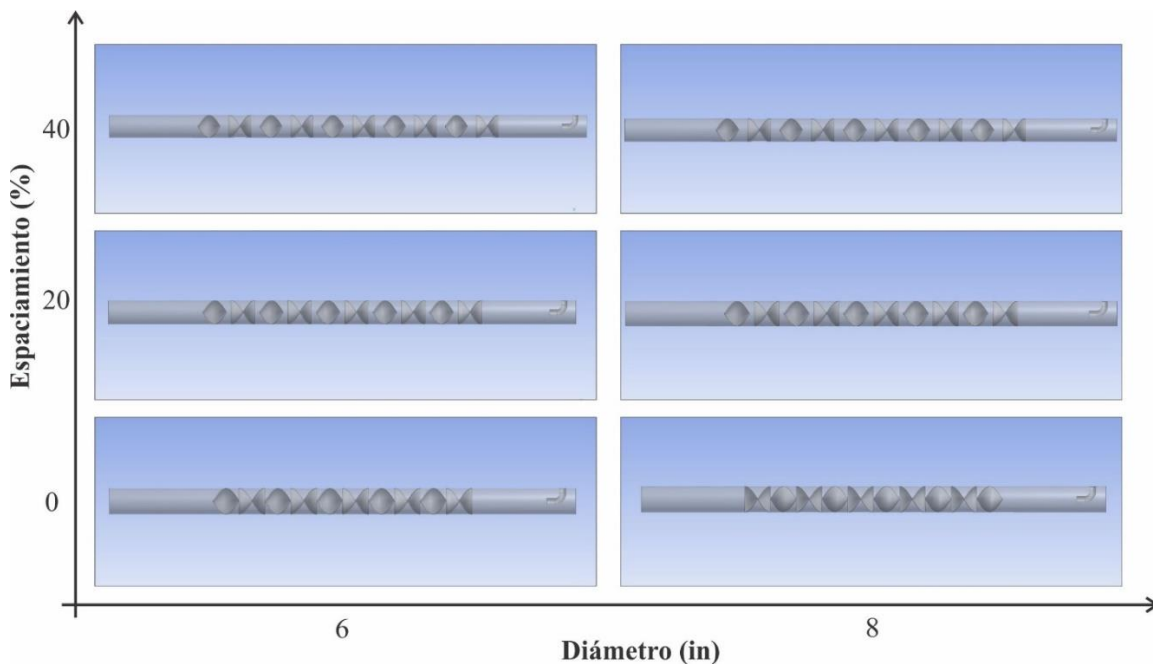
Computacional puedan ser flexibles en temas de recursos, pues los trabajos de simulación pueden ser más económicos que los realizados en un ambiente experimental. Teniendo esto en cuenta, se propone para trabajos futuros plantear estudios exhaustivos que permitan caracterizar de manera más completa la manera cómo se desempeña un mezclador estático para llegar a proponer cambios en su geometría que puedan incrementar su rendimiento.

Para esto se puede proponer el diseño de una matriz de modelos geométricos en los que se varíe desde uno hasta n parámetros. Se puede plantear el estudiar de qué manera afecta en la eficiencia de mezclado los cambios en el espaciamiento de los elementos de mezclado, su espesor, el cambio del diámetro del mezclador. Además, se puede replantear el diseño de la entrada de nafta con el objetivo de reducir la caída de presión generada, pues el diseño de la boquilla no es óptimo en este sentido. En su lugar, se puede configurar una entrada que no invada el dominio del flujo, y que haga ingresar a la nafta en cierto ángulo respecto a la dirección de flujo principal para generar una especie de premezclado en la zona de tubería vacía. De esta manera se podría hacer uso de menos elementos de mezclado y llegar a mejorar el requerimiento de energía de bombeo.

En la figura 26 se plantea un ejemplo de cómo se podría diseñar la matriz de modelos. En el caso descrito, se plantea el estudiar de qué manera afecta a la eficiencia de mezclado los cambios en el espaciamiento de los elementos de mezclado, junto con el cambio del diámetro del mezclador. Los modelos geométricos que se aprecian fueron generados para ilustrar los cambios físicos en el diseño.

Figura 26.

Matriz de modelos geométricos planteada como sugerencia para trabajos futuros.



De un estudio como el planteado se podrían obtener conclusiones bastante interesantes acerca del comportamiento de los fluidos dentro de la zona de mezclado, especialmente para los casos en que se encuentran espaciados los elementos internos, ya que en este estudio se analizó en detalle el efecto de estos sin ningún espaciamiento.

Además, también se puede sugerir el reemplazo del sistema de alimentación de nafta, pues uno de los factores influyentes en la alta caída de presión generada en el mezclador estático puede estar relacionado con la geometría de la boquilla de diámetro 2 in. Esta entrada de nafta se podría ubicar por fuera de manera perpendicular o con determinado ángulo respecto a la dirección de flujo.

Las principales conclusiones que se podrían generar en ese caso pueden estar relacionadas a los cuestionamientos de cómo afecta el espaciamiento a la eficiencia de mezclado, si tiende a mejorarla o, por el contrario, desfavorece el desempeño del mezclador. Además, también se puede

realizar un análisis a la caída de presión para determinar si el espaciamiento afecta de alguna manera significativa este parámetro.

Referencias Bibliográficas

- Abarca, A., Guzmán-Beckmann, L., & Castillo, J. (2020). Estudio del Efecto de Reductores de Viscosidad en Crudo Pesado. *Revista Tecnológica-ESPOL*, 32(1), 9-9.
- Alhajri, N. A., White, R. J., & Oshinowo, L. M. (2018). High Efficiency Static Mixer Technology for Crude Desalting. *All Days, All Days*. <https://doi.org/10.2118/192388-MS>
- Burgos Ramírez, D. A. & Casas Pulido, Y. F. (2019). Evaluación técnico-financiera de la aplicación del proceso de dilución en fondo en pozos de crudo pesado de un campo colombiano de la cuenca del Valle Medio del Magdalena (Tesis de pregrado). Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, Colombia.
- Cao, B., Qian, F., Ye, M., Guo, Y., Wang, S., Lu, J., & Han, Y. (2021). Pressure drop model for fibrous media in depth filtration: Coupling simulation of microstructure and CFD porous media during dust loading. *Building and Environment*, 202, 108015. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2021.108015>
- Díaz Aburto, H. A. (2016). Modelamiento fluido dinámico de un mezclador estático Kenics estudio de influencia del ángulo de torsión helicoidal en calidad de mezcla.
- Feurhuber, M., Neuschwander, R., Taupitz, T., Schwarz, V., Frank, C., & Hochenauer, C. (2021). A Computational Fluid Dynamics (CFD) model to simulate the inactivation of *Geobacillus stearothermophilus* spores in different moist heat sterilization environments. *Physics in Medicine*, 12, 100039. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.phmed.2021.100039>
- Haddadi, M. M., Hosseini, S. H., Rashtchian, D., & Olazar, M. (2020). Comparative analysis of different static mixers performance by CFD technique: An innovative mixer. *Chinese Journal of Chemical Engineering*, 28(3), 672–684. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.cjche.2019.09.004>
- Handbook of Industrial Mixing. (2003). In E. L. Paul, V. A. Atiemo-Obeng, & S. M. Kresta (Eds.), *Handbook of Industrial Mixing*. John Wiley & Sons, Inc. <https://doi.org/10.1002/0471451452>

- Hemsoth, N. (2021). *The future of large-scale CFD. The Next Platform*.
<https://www.nextplatform.com/2021/08/16/the-future-of-large-scale-cfd/>
- Heniche, M., Tanguy, P. A., Reeder, M., & Fasano, J. (2005). Numerical Investigation of Blade Shape in Static Mixing. *AIChE Journal*, *51*, 44–58. <https://doi.org/10.1002/aic.10341>
- Jalilibal, Z., Amiri, A., Castagliola, P., & Khoo, M. B. C. (2021). Monitoring the coefficient of variation: A literature review. *Computers & Industrial Engineering*, *161*, 107600.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.cie.2021.107600>
- Jiang, X., Xiao, Z., Jiang, J., Yang, X., & Wang, R. (2021). Effect of element thickness on the pressure drop in the Kenics static mixer. *Chemical Engineering Journal*, *424*, 130399.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.cej.2021.130399>
- Kumar Cheeda, V., Kumar, R. V., & Nagarajan, G. (2008). Design and CFD analysis of a regenerator for a turboshaft helicopter engine. *Aerospace Science and Technology*, *12*(7), 524–534.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ast.2007.12.005>
- Meng, H., Wang, F., Yu, Y., Song, M., & Wu, J. (2014). A Numerical Study of Mixing Performance of High-Viscosity Fluid in Novel Static Mixers with Multitwisted Leaves. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, *53*, 4084–4095. <https://doi.org/10.1021/ie402970v>
- Menter, F. R. (1994). Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications. *AIAA Journal*, *32*(8), 1598–1605. <https://doi.org/10.2514/3.12149>
- Moliere, M., Vierling, M., Aboujaib, M., Patil, P., Eranki, A., Campbell, A. & Pandey, N. (2009). Gas Turbines in Alternative Fuel Applications: Bio-Ethanol Field Test. Proceedings of ASME Turbo Expo 2009: Power for Land, Sea and Air, 1. <http://dx.doi.org/10.1115/GT2009-59047>
- Morozova, N., Trias, F. X., Capdevila, R., Pérez-Segarra, C. D., & Oliva, A. (2020). On the feasibility of affordable high-fidelity CFD simulations for indoor environment design and control. *Building and Environment*, *184*, 107144. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2020.107144>

- Peralta Sanchez, A. F., Blanco Sanchez, J. D., Reina Gonzalez, J. F., & Mantilla Ramirez, L. E. (2017). Transporte de crudo pesado por oleoducto usando el método de dilución: Un enfoque práctico para modelar la caída de presión y la precipitación de asfaltenos. *Revista Fuentes, El Reventón Energético*, 15(2).
- Pinto Sánchez, Y. F., & Herrera Joya, J. Y. (2021). METODOLOGÍA EN LA SELECCIÓN Y CORRECTA APLICACIÓN DE TECNOLOGÍA EN REDUCCIÓN DE VISCOSIDAD DE CRUDO (PESADO Y EXTRAPESADO) PARA SU TRANSPORTE POR TUBERÍAS.
- Rajeesh, S., Methre, J., & Godiganur, S. (2021). CFD analysis of combustion characteristics of CI engine run on biodiesel under various compression ratios. *Materials Today: Proceedings*. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.04.193>
- Sanchez, A. F. P., Sanchez, J. D. B., Gonzalez, J. F. R., & Ramirez, L. E. M. (2017). Transporte de crudo pesado por oleoducto usando el método de dilución: Un enfoque práctico para modelar la caída de presión y la precipitación de asfaltenos. *Fuentes, el reventón energético*, 15(2), 7-17.
- Selimefendigil, F., & Öztop, H. F. (2021). Thermoelectric generation in bifurcating channels and efficient modeling by using hybrid CFD and artificial neural networks. *Renewable Energy*, 172, 582–598. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.renene.2021.03.046>
- Soman, S. (2016). *Study of Effects of Design Modification in Static Mixer Geometry and its Applications*. [UWSpace]. <http://hdl.handle.net/10012/10802>
- Straw, M., Aglave, R., & Piccioli, R. (2021). Integrated Approach to Multiphase Flow Regime Prediction Through Computational Fluid Dynamics CFD. *Day 3 Wed, August 18, 2021, Day 3 Wed.*, <https://doi.org/10.4043/31096-MS>
- Thakur, R. K., Vial, C., Nigam, K. D. P., Nauman, E. B., & Djelveh, G. (2003). Static Mixers in the Process Industries—A Review. *Chemical Engineering Research and Design*, 81(7), 787–826. <https://doi.org/https://doi.org/10.1205/026387603322302968>

- Tsai, K. (2015). CFD Modeling Of WBGT For An Offshore Platform. *Day 2 Tue, September 29, 2015, Day 2 Tue.*, <https://doi.org/10.2118/174963-MS>
- Wang, L., Martin, J. E., Felli, M., & Carrica, P. M. (2020). Experiments and CFD for the propeller wake of a generic submarine operating near the surface. *Ocean Engineering*, *206*, 107304. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2020.107304>
- Wee, S. K., & Yap, Y. J. (2019). CFD study of sand erosion in pipeline. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, *176*, 269–278. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.petrol.2019.01.001>
- Wendt, J., Anderson, J., Degrez, G., Dick, E., & Grundmann, R. (2009). *Computational Fluid Dynamics* (J. F. Wendt (ed.); Third Edit). Springer Berlin Heidelberg. <https://doi.org/10.1007/978-3-540-85056-4>
- Zhang, B., Dao, M. H., Xing, X., & Lou, J. (2021). *CFD Study of the Wind Load on a LNG Carrier. All Days.*