

**MODELAMIENTO Y SIMULACIÓN NUMÉRICA DE LA DILUCIÓN CRUDO
PESADO – NAFTA EN UN MEZCLADOR ESTÁTICO UTILIZANDO UNA
HERRAMIENTA DE DINÁMICA COMPUTACIONAL DE FLUIDOS (CFD)**

NAYLA XIOMARA LOZADA GARCIA

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO – QUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA DE PETRÓLEOS
BUCARAMANGA
2015**

**MODELAMIENTO Y SIMULACIÓN NUMÉRICA DE LA DILUCIÓN CRUDO
PESADO – NAFTA EN UN MEZCLADOR ESTÁTICO UTILIZANDO UNA
HERRAMIENTA DE DINÁMICA COMPUTACIONAL DE FLUIDOS (CFD)**

NAYLA XIOMARA LOZADA GARCIA

**Trabajo de grado presentado como requisito para optar al título de
INGENIERA DE PETRÓLEOS**

DIRECTOR

GERMAN GONZALEZ SILVA

Ingeniero Químico, Ph.D.

COORDIRECTOR

JOSÉ ROBERTO NUNHEZ

Ingeniero Químico, Ph.D.

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO - QUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERIA DE PETRÓLEOS
BUCARAMANGA**

2015

DEDICATORIA

Al dueño de la vida y del amor verdadero, TÚ mi Dios.

A mi mayor bendición y motivación, Mi familia.

Nayla X. Lozada G.

AGRADECIMIENTOS

Mi mayor agradecimiento está dirigido a Dios, a mis padres y hermano por su infinito y verdadero amor y por haberme brindado su apoyo incondicional durante todos estos años, permitiendo que hiciera realidad cada uno de mis sueños.

Agradezco especialmente a mis tíos Luis Carlos y Omaira, por haberse convertido en mis segundos padres durante el tiempo de mi formación profesional, permitiéndome ser una hermana para Mary y Fer, a quienes quiero profundamente y agradezco su confianza y cariño.

A mis amigas Juliana, Luz, Laura y Keidy por ser esas hermanas que Dios y la vida me regalaron, por su cariño y confianza.

A mis amigos Oscar, Carolina, Victor, Felipe y Carlos por haber hecho parte de este proceso y por cada uno de los momentos compartidos en estos años.

A Diego, por su ayuda en la revisión de mi trabajo, por su apoyo y por hacer mis días más felices.

A Helver Álvarez Castro por su ayuda, comprensión y ánimo durante la elaboración de este trabajo.

Al profesor Germán González Silva, por su dirección y enseñanzas académicas durante la realización de mi proyecto de grado.

Al profesor José Roberto Nunhez y a los muchachos del laboratorio de Dinámica Computacional de Fluidos de la Universidad Estatal de Campinas SP – Brasil por su ayuda, apoyo técnico y acogida durante mi estancia en Brasil.

No te rindas, mantente de pie. Recuerda que Dios les da las batallas más difíciles a sus mejores soldados.

Papa Francisco.

TABLA DE CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	16
1. MARCO TEÓRICO	18
1.1 DINÁMICA COMPUTACIONAL DE FLUIDOS.....	18
1.2 MEZCLADORES ESTÁTICOS.....	20
1.2.1 Tipos de Mezcladores Estáticos.....	20
1.2.2 Áreas de Aplicación:	21
1.3 CFD EN MEZCLADORES ESTÁTICOS.....	24
1.4 CFD EN LA INDUSTRIA DEL PETRÓLEO.....	26
1.5 DILUCIÓN DE CRUDOS	29
2. MODELAMIENTO MATEMÁTICO	31
2.1 ECUACIÓN DE CONSERVACIÓN, CONTINUIDAD Y MOMENTO..	31
2.2 ECUACIÓN DE CONSERVACIÓN DE ENERGÍA.....	32
2.3 MODELO DE TURBULENCIA.....	34
2.3.1 Modelo Shear Stress Transport (SST).....	36
2.4 Métodos Numéricos.....	37
2.4.1 Método de los Volúmenes Finitos.....	37
3. METODOLOGÍA COMPUTACIONAL	41
3.1 IDENTIFICACIÓN DEL PROBLEMA	42
3.2 PRE – PROCESAMIENTO DEL MODELO.....	42
3.3 SOLUCIÓN.....	48

3.1	PÓS – PROCESAMIENTO	49
4.	ANÁLISIS DE RESULTADOS	50
4.1	PERFILES DE VELOCIDAD	50
4.2	PERFILES DE FRACCIÓN MÁSCA	53
4.3	CAÍDA DE PRESIÓN POR UNIDAD DE LONGITUD.....	58
4.4	CASO DE ESTUDIO (ETANOL Y PENTANOL).....	59
5.	CONCLUSIONES.....	61
6.	TRABAJOS FUTUROS	63
	BIBLIOGRAFÍA.....	64

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Rotor de turbina. Adaptado de Chen, <i>et.al.</i> (2013).....	19
Figura 2. Energía Cinética de Turbulencia alrededor de la turbina. Adaptado de Goundar, <i>et.al.</i> (2013).	19
Figura 3. Mezcladores comerciales. Adaptado de Thakur <i>et.al.</i> (2003).....	22
Figura 4. Velocidad de la fase. Adaptado de Jovanovic, <i>et.al.</i> (2014).....	25
Figura 5. Geometría de mezcladores estáticos tipo DS A-I y Fins 45°. Adaptado de Joaquim <i>et.al.</i> (2011)	26
Figura 6. Contorno de presión y líneas de corriente. Adaptado de Halimi, <i>et.al.</i> (2012).	27
Figura 7. Concentración de gas a la entrada de ventilación de las salas de máquinas. Adaptado de Dadashzadeh, <i>et.al.</i> (2013).....	28
Figura 8. Diagrama de líneas de corriente para el flujo del catalizador a lo largo del reactor (arriba) y la entrada en la intersección entre las dos entradas del reactor (abajo). Adaptado de González (2012).....	29
Figura 9. Volumen de Control. a. Volumen Finito Bidimensional. b. Tres volúmenes de control con tres puntos nodales (W, P y dos interfaces (w y e)). Adaptado de Alvarez-Helver (2011).....	40
Figura 10. Metodología Computacional. Adaptado de Alvarez-Helver (2014).....	41
Figura 11. Geometria del mezclador estático LPD (Low Drop Pressure)	44
Figura 12. Malla Tetraédrica. a. Prismas en la pared del tubo. b. Corte transversal. Prismas en los elementos de mezclado.	45
Figura 13. Campo de velocidades a la entrada del mezclador.....	46

Figura 14. Perfil Longitudinal de Velocidades. a) Tubo Liso $V_{m\acute{a}x}=1.18$. b) Mezclador DLP $V_{m\acute{a}x}=1.18$. c) Tubo Liso $V_{m\acute{a}x}=3$. d) Mezclador DLP $V_{m\acute{a}x}=3$.	51
Figura 15. Perfil Transversal de Velocidad.	52
Figura 16. Perfiles Transversales de Fracción Másica para Nafta.	53
Figura 17. Perfiles Transversales de Fracción Másica a la Entrada del Mezclador Estático. a) Nafta.	54
Figura 18. a) Mezclador estático de doble escama. Adaptado de Joaquim <i>et.al</i> (2011). b) Mezclador estático LPD simulado.	55
Figura 19. Perfiles Transversales de Fracción Másica para Nafta a $L/D=8$ y $L/D=12$.	56
Figura 20. Perfiles Transversales de Fracción Másica para $L/D=12$	60

LISTA DE GRAFICAS

Gráfica 1. Monitores de RMS para balance de masa y momento para el mezclador estático LPD.....	48
Gráfica 2. Distribución de Velocidad.	52
Gráfica 3. Distribución de Concentración de Nafta.....	55
Gráfica 4. Distribución de Concentración de Nafta para L/D=8 y L/D=12.....	57
Gráfica 5. Caída de Presión por Unidad de Longitud.	58
Gráfica 6. Comparación de caída de presión entre mezcladores estáticos comerciales y mezclador estático LPD simulado.	58
Gráfica 7. Distribución de Concentración para L/D=12	60

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Aplicaciones industriales de los mezcladores estáticos. Adaptado de Thakur <i>et.al.</i> (2003).....	23
Tabla 2. Aplicaciones de CFD – Métodos de solución	39
Tabla 3. Especificaciones Geométricas	43
Tabla 4. Características de la malla.	43
Tabla 5. Propiedades de los Fluidos	46
Tabla 6. Tiempo de simulación	47
Tabla 7. Características del Computador	47

RESUMEN

TITULO: MODELAMIENTO Y SIMULACIÓN NUMÉRICA DE LA DILUCIÓN CRUDO PESADO – NAFTA EN UN MEZCLADOR ESTÁTICO UTILIZANDO UNA HERRAMIENTA DE DINÁMICA COMPUTACIONAL DE FLUIDOS (CFD)*.

AUTOR: NAYLA XIOMARA LOZADA GARCÍA**

PALABRAS CLAVE: MEZCLADORES ESTÁTICOS, MEZCLA, CFD, CRUDO PESADO, NAFTA.

En los últimos años el uso de mezcladores estáticos ha incrementado por la alta capacidad de mezcla que proporcionan a los fluidos. Además de eso, el moderado espacio, bajo costo de mantenimiento y operación debido a los elementos fijos en el interior de la tubería, hacen de este un dispositivo de interés.

Luego del agotamiento de los hidrocarburos de fácil extracción, los crudos pesados han tomado un lugar importante en la industria del petróleo. Teniendo en cuenta que este tipo de combustibles se caracteriza por tener alta densidad y viscosidad, que dificultan las operaciones, es necesario garantizar, tanto la extracción, como el transporte de este recurso, con el objetivo de satisfacer las necesidades energéticas del mundo.

El transporte de petróleo pesado a través de oleoductos se torna complejo por causa de sus propiedades físicas. Con el fin de solucionar este problema, actualmente se utiliza un hidrocarburo de alta gravedad API, el cual permite disminuir la densidad y viscosidad del fluido. Con el objetivo de lograr una mezcla adecuada, los mezcladores estáticos podrían ser una alternativa para alcanzar características que faciliten el transporte de este tipo de crudo.

Teniendo en cuenta la importancia de mezcla u homogenización de fluidos para el transporte en la industria petrolífera, en este trabajo se estudia la fluido dinámica de hidrocarburos de diferentes densidades y viscosidades en mezcladores estáticos, a fin de determinar cualitativamente la homogenización de fluidos al pasar a través de los elementos fijos en el interior. Este estudio fue realizado utilizando la Dinámica Computacional de Fluidos (CFD), la cual es una importante herramienta que permitió predecir, por medio de modelos matemáticos, el comportamiento de la mezcla de dos hidrocarburos con propiedades de crudo pesado y nafta.

* Trabajo de grado

** Facultad de Ingenierías Físico – Químicas. Escuela de Ingeniería de Petróleos. Director: Ph.D. Germán González Silva. Co-Director: Ph.D. José Roberto Nunhez, Universidad Estatal de Campinas.

ABSTRACT

TITLE: MODELLING AND NUMERICAL SIMULATION OF HEAVE OIL – NAFTA DILUTION IN A STATIC MIXER USING A COMPUTATIONAL FLUID DYNAMIC (CFD) TOOL*.

AUTHOR: NAYLA XIOMARA LOZADA GARCÍA.**

KEY WORDS: STATIC MIXER, MIXING, CFD, COMPUTATIONAL FLUID DYNAMIC, HEAVY OIL.

DESCRIPTION:

In the petroleum industry, the mixing processes are important of the heavy oil transport. In recent years the use of static mixers has increasing for the high capacity to mix that it provide to the fluids. In addition, the moderate space, low maintain and operation cost for the fixed elements in the pipe, made of this an interesting device.

After decrease light hydrocarbons, heavy oil has taken an important place in oil industry. Considering that this kind of combustible is characterizing for the high density and viscosity, that makes difficult the operations, is necessary to guarantee, as the extraction as the resource transport, with the objective of satisfy the energetic necessities of the world.

The heavy oil transport across pipeline is complex because of their physical properties. In order to solve this problem, nowadays is used a hydrocarbon with high API gravity, which allow reducing the high fluid density and viscosity. With the purpose of manage an appropriate mix; the static mixers could be an excellent alternative to reach features that facilitate the resource transport.

Taking into account the importance of fluid mixing and homogenization for the transport in the petroleum industry, in this work is study the fluid dynamics of hydrocarbons with different densities and viscosities in static mixers, in order to determine qualitatively the homogenization of fluid passing across of the static elements inside. The study was conducted using the Computational Fluid Dynamics (CFD), a powerful tool that allowed predicting, through mathematical models, the behavior of the hydrocarbon mixing of heave oil and nafta properties.

* Work Degree

** Physico-Chemical Engineering Faculty, School of Petroleum Engineering. Director: Ph.D. Germán González Silva. Co-Director: Ph.D. José Roberto Nunhez, Campinas University.

INTRODUCCIÓN

La Dinámica Computacional de Fluidos (CFD) es una herramienta de simulación y modelamiento de la fluidodinámica de sistemas dinámicos o estáticos en los que intervienen fluidos. En CFD es necesario resolver las ecuaciones de conservación de masa, movimiento y energía utilizando métodos numéricos, tal solución requiere un costo computacional a veces alto, que con el avance de los ordenadores en los últimos años ha incursionado en diferentes campos industriales, proporcionando optimización de procesos a bajo costo, realizando cálculos precisos e involucrando tres disciplinas, entre ellas la dinámica de fluidos, las matemáticas y los procesadores, con el objetivo de estudiar el flujo de fluidos.

La implementación de CFD en ingeniería presenta diferentes ventajas; la principal y la cual hace de esta, una herramienta atractiva en procesos industriales, es la capacidad de complementar las aproximaciones analíticas con las aproximaciones experimentales. Esta técnica permite proveer una alternativa costo-efectiva en la simulación de flujo de fluidos reales, reduciendo tiempo y costos de diseño, evaluando diferentes alternativas y parámetros dimensionales. Otra de las ventajas de CFD se enfoca en la capacidad que tiene para simular condiciones de flujo que resultan ser peligrosas al reproducirlas en prototipos construidos en el laboratorio, pues pueden ocasionar accidentes. También ofrece la posibilidad de visualizar virtualmente en 2D y 3D, áreas donde el ojo humano no puede acceder, y detallar la información en cuanto al flujo de fluidos, en una región específica o en todo el volumen de control.

Los mezcladores estáticos, en la industria de los hidrocarburos, llegarían a ser de gran utilidad en los procesos de dilución de crudos pesados, pues al mezclar el petróleo pesado con un hidrocarburo liviano como la nafta, permite lograr un mezclado uniforme y rápido, reduciendo la viscosidad y densidad. En Colombia, la dilución de este tipo de combustibles es importante teniendo en cuenta las reservas existentes del recurso, razón por la cual es necesario el desarrollo de esta actividad para el transporte del carburante hacia los sitios de interés.

En este trabajo se pretende utilizar CFD para simular la fluido dinámica de la mezcla crudo pesado – nafta en un mezclador estático, que en procesos industriales está

enfocada a la simulación de mezcladores estáticos y al análisis del comportamiento de los fluidos, que se genera en el interior de este.

1. MARCO TEÓRICO

En este capítulo se presenta una descripción de la fundamentación teórica de mezcladores estáticos. La revisión también muestra las principales industrias en las cuales se utilizan estos dispositivos, el tipo de fluido característico que puede operar cada mezclador, dependiendo de la geometría y el beneficio económico que representan en cualquier proceso de mezcla. Por último, se muestra algunos estudios realizados con CFD en diferentes áreas y sus aplicaciones en la industria del petróleo.

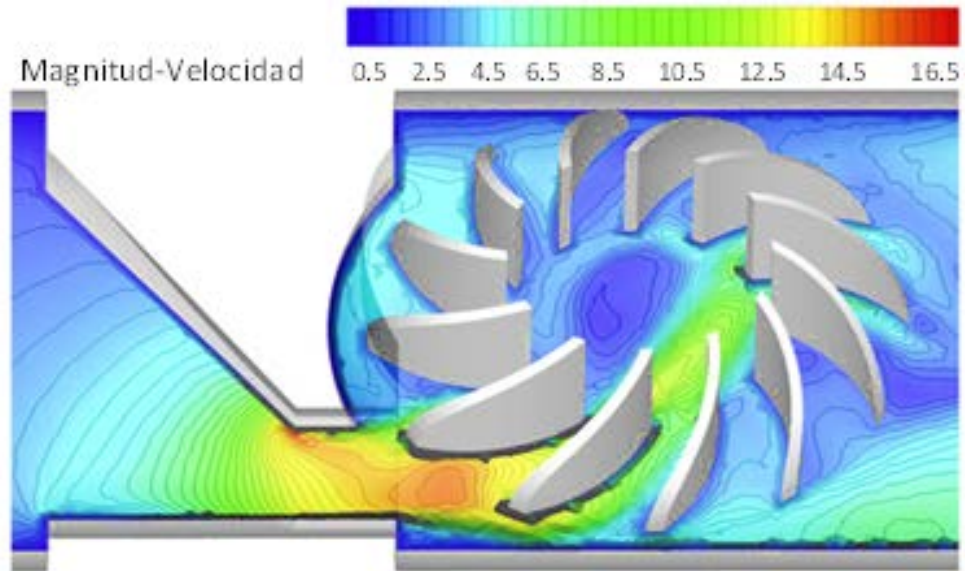
1.1 DINÁMICA COMPUTACIONAL DE FLUIDOS

La Dinámica Computacional de Fluidos (CFD) es una herramienta de diseño industrial, que ayuda a reducir escalas de tiempo y mejorar procesos de ingeniería. En las dos últimas décadas, CFD ha tenido un desarrollo importante en diferentes áreas de la ingeniería, por ejemplo: I) en ingeniería biomédica proporciona la capacidad de investigación en torno a aneurismas y enfermedades de la arteria coronaria (MASAAKI *et.al.*, 2014, SUN *et.al.*, 2014), II) en ingeniería civil en el área de diseño, específicamente en el estudio de fenómenos Aero – termales de ventilación mecánica (ZHANG *et.al.*, 2013), III) en ingeniería deportiva estudia las posturas ergonómicas de los deportista para analizar la resistencia aerodinámica a partir de distribuciones de presión (BLOCKEN *et.al.*, 2012), IV) en ingeniería aerodinámica e ingeniería automotriz CFD es la herramienta encargada del diseño aerodinámico de aeronaves y automóviles (NAKAHASHI *et.al.*, 2014).

De igual forma Chen *et.al.* (2013) estudiaron el comportamiento del flujo de agua en una turbina usando ANSYS CFD. Las simulaciones fueron validadas en el laboratorio con prototipos fabricados, demostrando que el modelamiento con esta herramienta es una excelente guía para el diseño del rotor mostrado en la Figura 1. Rotor de turbina.

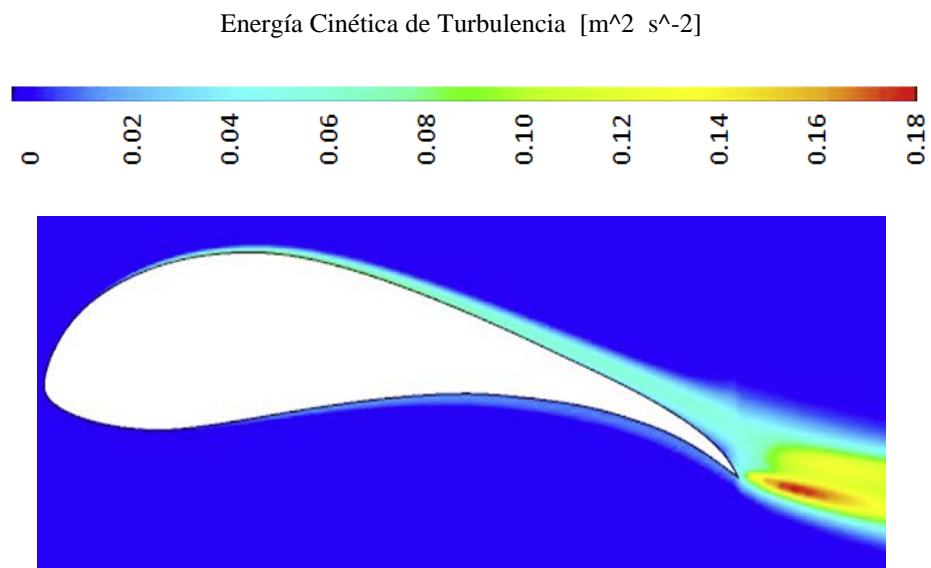
En otra investigación realizada por Goundar *et.al.* (2013) se observó el funcionamiento de turbinas, donde se estudiaron las características hidrodinámicas de las mismas para compararlas con prototipos experimentales, presentando contornos de energía cinética de turbulencia como el mostrado en la

Figura 1. Rotor de turbina.



Adaptado de Chen, *et.al.* (2013)

Figura 2. Energía Cinética de Turbulencia alrededor de la turbina.



Adaptado de Goundar, *et.al.* (2013).

1.2 MEZCLADORES ESTÁTICOS

Los mezcladores estáticos han llegado a ser ampliamente utilizados en procesos industriales, proporcionando la construcción de nuevos diseños y la implementación en diferentes áreas. Existen más de 30 tipos de mezcladores estáticos comerciales disponibles y cerca de 2000 patentes alrededor del mundo. El desarrollo de estos dispositivos ha incrementado notablemente en los últimos años, debido a la alta capacidad de mezclado con bajo tiempo de residencia, bajo requerimiento de energía y bajo costo de mantenimiento por no tener partes móviles. (GHANEM *et.al.*, 2013)

El diseño básico de un mezclador estático supone el uso de una serie de elementos sólidos dispuestos en el interior de una tubería, columna o reactor; estos elementos fijos cumplen la función de redistribuir el fluido en la dirección transversal a la dirección principal de flujo. Para lograr esta redistribución es necesario analizar el tipo de geometría a utilizar; es decir, de qué forma y en qué cantidad estarán distribuidos los elementos en el interior del mezclador. (MUSHTAK Al – Atabi 2011)

Los mezcladores estáticos tienen un amplio rango de aplicaciones, que va desde la mezcla de fluidos miscibles para lograr una fase inmiscible, hasta la transferencia de calor y homogenización térmica. El mecanismo básico de mezclado de estos dispositivos debe ser diferenciado entre flujo turbulento y flujo laminar. Para fluidos de alta viscosidad se presenta la no homogenización de los componentes por tanto, el flujo turbulento promueve movimientos de las sustancias provocando un rápido mezclado en forma radial. Este nivel de turbulencia también se puede incrementar con las altas caídas de presión que se presenten en el mezclador, por esta razón no es necesario cambiar el diámetro y el caudal de flujo de la tubería para que esto ocurra. (GHANEM *et.al.*, 2013).

1.2.1 Tipos de Mezcladores Estáticos: Existen cerca de 30 tipos de mezcladores estáticos comerciales, los cuales han sido clasificados dependiendo de las características que presentan y el tipo de proceso en el cual pueden ser utilizados.

Estos dispositivos de mezclado pueden ser organizados en 5 grupos principales: (I) diseños abiertos con hélices, (II) diseños abiertos con cuchillas, (III) platos corrugados,

(IV) diseños *multi layers*, y (V) diseños cerrados con canales o huecos. Estos diseños mencionados anteriormente son distribuidos en cuatro (4) nuevos grupos teniendo en cuenta el área industrial en la que tienen aplicación: (I) mezcla de fluidos miscibles, (II) generación de interface entre fases no miscibles, (III) transferencia de calor y homogenización termal, y (IV) mezclado axial. (THAKUR *et.al.*, 2003).

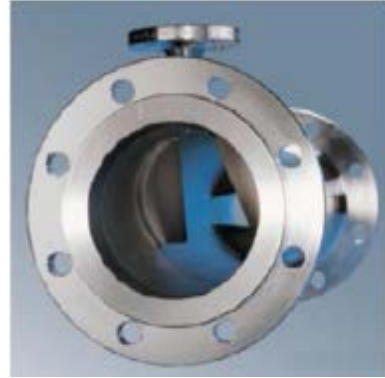
Entre las configuraciones geométricas de mezcladores estáticos que se pueden encontrar actualmente, hay diseños abiertos con hélices (Helical Kenics-Chemineer, Inc.) y diseños con alta eficiencia de mezclado (Chemineer, Inc), utilizados para flujo laminar y turbulento en homogenización de polímeros y dispersión de gases; diseños con cuchillas (Ross Engineering, Inc.), los cuales tienen aplicaciones para flujo laminar y turbulento en mezcla de resinas, gasolina y aceite; diseños para transferencia de mezcla (Komax System, Inc.), utilizados en procesos que involucran flujo turbulento en mezcla de productos alimenticios; diseños con placas corrugadas (SMV (Sulzer, Inc.)), aplicados para flujo laminar en mezclas de baja viscosidad y baja transferencia de masa; diseños multicapa (SMX and SMXL (Sulzer, Inc)), utilizados para régimen de flujo laminar en homogenización de polimeros; diseños cerrados con canales o huecos (Interfacial Surface Generator (Ross Engi-neering, Inc.)), empleados únicamente para flujo turbulento en la mezcla de polímeros. Algunos de estos mezcladores son mostrados en la Figura 3. (JOVANOVIC *et.al.*, 2014).

1.2.2 Áreas de Aplicación: Por su alta eficiencia de mezclado y bajo costo de mantenimiento, entre otras características, los mezcladores estáticos tienen un amplio nivel de aplicación. Entre las industrias que muestran la implementación de este tipo de dispositivos se encuentra la industria química, de alimentos, minera, petroquímica y refinamiento, de polímeros, textil y pinturas. La Tabla 1, resume la industria y el tipo de aplicación de los mezcladores estáticos.

Figura 3. Mezcladores estáticos comerciales.



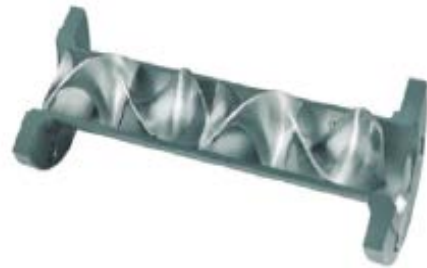
KMX - V (Chemineer, Inc)



SMI (Sulzer, Inc)



Custody Transfer (Komax System, Inc)



Kenics KMS (Chemineer, Inc)



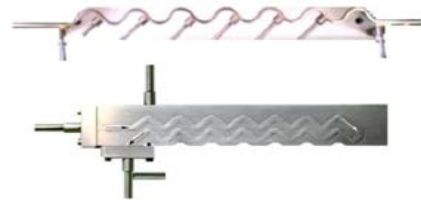
SMX (Sulzer, Inc)



ZT - MX (Zelen Tech, Ltda)



Standard LPD (Ross Engineering, Inc.)



Corrugated Channel Reactor (Laboratory Pilot)

Adaptado de Thakur *et.al.* (2003)

Tabla 1. Aplicaciones industriales de los mezcladores estáticos.

INDUSTRIA	APLICACIÓN
Química	Reacciones Mezcla de gases Dispersión líquido – líquido, orgánico - acuosa Preparación de fertilizantes y pesticidas Inyección de vapor Neutralización ácido – base
Procesamiento de Cereales	Producción continua y conversión de almidón Mezclado de comida para ganado
Procesamiento de Alimentos	Mezclado de líquidos y emulsiones Mezcla de almidones Calentamiento y enfriamiento de soluciones de azúcar
Procesamiento de Minerales	Recobro de minerales por extracción de solvente Dilución Oxidación y blanqueamiento Adición química
Petroquímica y Refinamiento	Mezcla de reactantes gaseosos Mezcla de gasolina Mezcla de petróleo Emisiones controladas y monitoreadas
Farmacéutica y Cosmética	Mezclado de trazas de elementos Mezcla de medicamentos multi-componentes Dispersión de aceites Esterilización Control de pH
Polímeros, Plásticos y Textiles	Producción continua de poliestireno Mezcla de polímeros Precalentamiento de polímeros Homogenización termal
Pinturas, Resinas y Adhesivos	Dilución de sólidos Coloración y tinturas Calentamiento y dispersión de adhesivos Control de pH Producción continua de poliestireno Mezcla de polímeros Precalentamiento de polímeros
Tratamiento de Agua	Adición de agentes coagulantes Desinfección Decloración Control de pH

Adaptado de Thakur *et.al.* (2003)

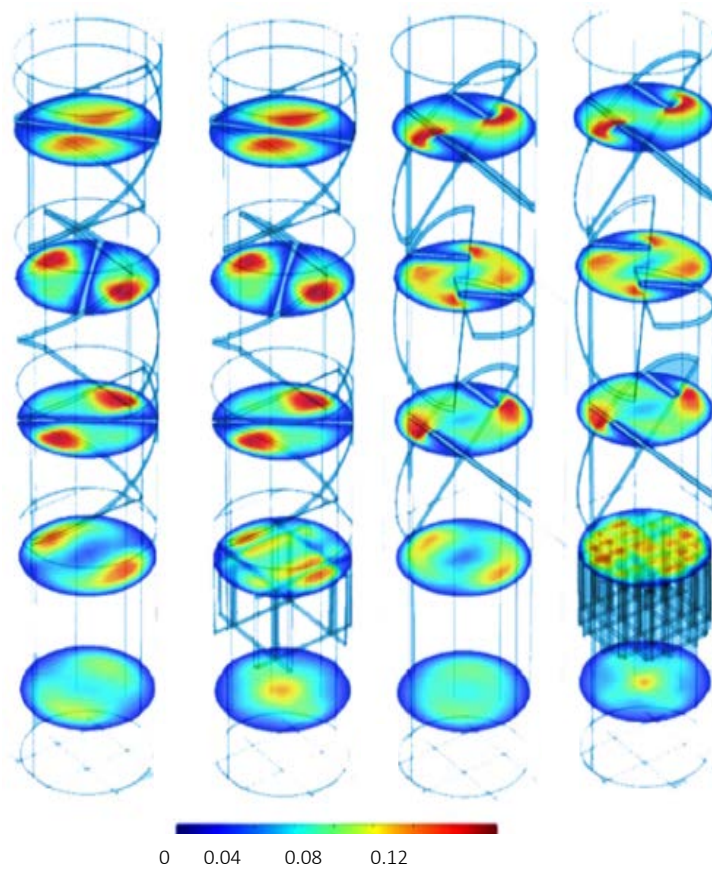
1.3 CFD EN MEZCLADORES ESTÁTICOS.

Saadijian *et.al.* (2011), estudiaron la advección caótica y mezclado en un mezclador estático comercial tipo Kenic KM, uno de los más utilizados en la Industria Química. Dicho análisis fue realizado en OpenFOAM, para flujos caóticos en dos y tres dimensiones. El uso de este tipo de herramienta, hace posible el modelamiento de una geometría compleja y permite resolver sus respectivas ecuaciones de conservación a partir de un volumen de control o el método de volúmenes finitos. Por otro lado, CFD posibilita la opción de simular fluidos complejos y modificar geometrías que proporcionen la obtención de mejores resultados.

Los mezcladores estáticos, específicamente el tipo T, han sido útiles en el análisis de nano partículas. En la investigación realizada por Palanisamy *et.al.* (2012), se demostró que con el uso de este mezclador, se tiene un mejor control sobre la aglomeración del fluido a partir de la manipulación de los parámetros de flujo. El principal objetivo de esta investigación fue observar el comportamiento que presenta el fluido y determinar el mejor mecanismo de mezclado para el proceso. La simulación fue realizada con ayuda de la técnica CFD y se dispuso de tres tasas de flujo, cada una con un mecanismo de mezclado distinto.

Jovanovic *et.al.* (2014) estudiaron el flujo granular en mezcladores estáticos, simulando el flujo de fluidos como modelo Euleriano para el fluido y elementos discretos para modelar los sólidos. Los resultados obtenidos en la simulación fueron comparados con las medidas tomadas en el laboratorio en un modelo construido a escala real. Con la comparación de dichos modelos se demostró que existe una aproximación significativa, la cual provee una válida aplicación para la optimización de mezcladores. La optimización en este tipo de dispositivos es importante, teniendo en cuenta que en los últimos años, han tenido un amplio desarrollo en procesos industriales, utilizando geometrías específicas que influyen en la estructura de flujo, mejorando la transferencia de masa y calor en la sección transversal. La Figura 4 presenta la velocidad de la fase de flujo para los cuatro tipos de mezcladores utilizados en este estudio.

Figura 4. Velocidad de la fase.



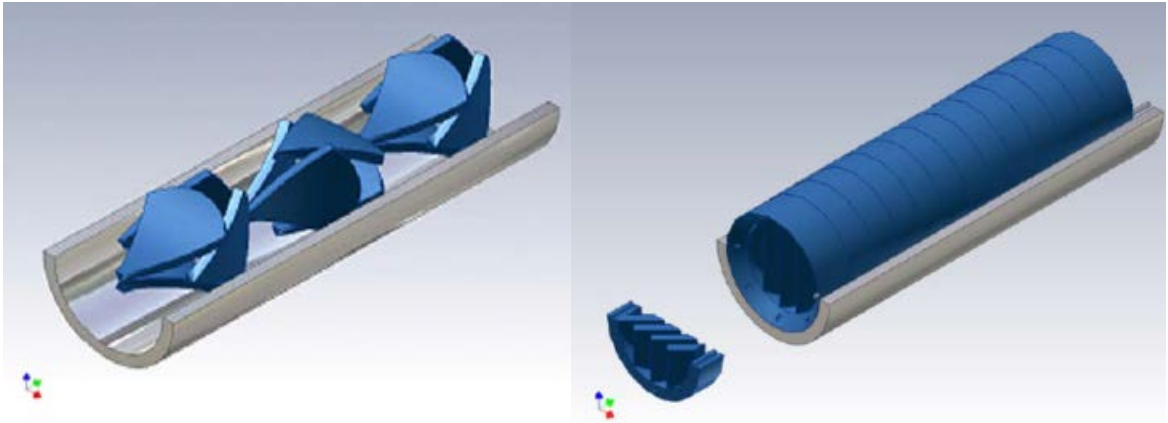
Adaptado de Jovanovic, *et.al.* (2014)

La geometría de los elementos fijos del mezclador estático es la característica más importante, pues de esta depende la eficiencia de mezclado y el consumo de energía que este dispositivo llega a experimentar. Joaquim *et.al.* (2011), desarrollaron una guía general para el diseño de nuevas geometrías, según la construcción de dicha guía, los elementos dispuestos en el interior del mezclador deben cumplir con ciertas condiciones: (I) deben restringir el flujo y (II) desviarlo; (III) deben ser rotados alrededor de la dirección de flujo para dar simetría, (IV) extenderse desde el centro de la tubería hasta el límite con las paredes de la misma, y tener la capacidad de (V) distribuir y mezclar el flujo.

El análisis de estos parámetros fue realizado a partir de CFD, donde se simularon las velocidades, la fracción másica de los componentes de los fluidos, y la presión total a

través del sistema. Con la observación de estos parámetros se determinaron dos tipos de mezcladores, el Fins 45° y el DS A-I, mostrados en la Figura 5 , los cuales muestran los mejores resultados de eficiencia de mezclado y caída de presión.

Figura 5. Geometría de mezcladores estáticos tipo DS A-I y Fins 45°.



Adaptado de Joaquim *et.al.* (2011)

1.4 CFD EN LA INDUSTRIA DEL PETRÓLEO

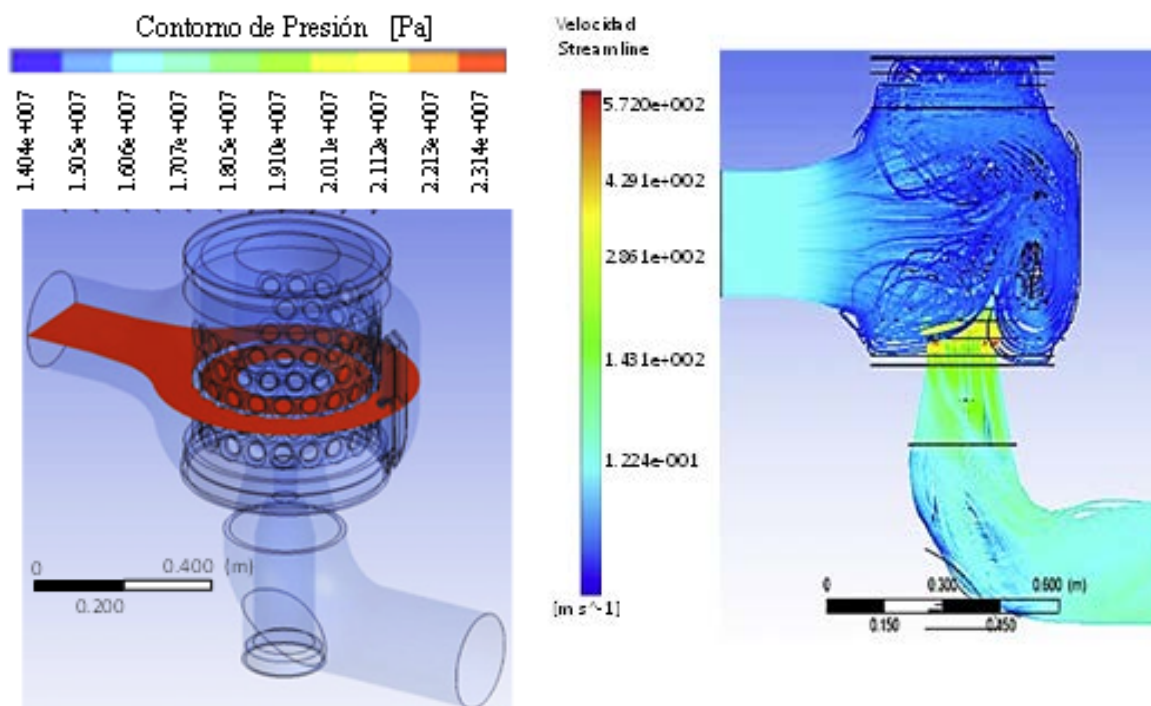
CFD se ha convertido en una de las herramientas más importantes en la industria del petróleo y gas. Según Ahmad (2012), director de las industrias de energía y procesos en ANSYS Inc., CFD permite un rápido análisis con diferentes condiciones de proceso, para simular condiciones de flujo que resultan ser difíciles al reproducirlas en prototipos construidos en el laboratorio. También ofrece la posibilidad de visualizar virtualmente en 2D y 3D, áreas donde el ojo humano no puede acceder, y detallan la información en cuanto a la dinámica de fluidos, en una región específica o en todo el volumen de control.

El uso de esta importante herramienta se ha extendido desde hace varios años en la industria del petróleo. Lars y Terje (1998), estudiaron la erosión que puede experimentar una válvula de choque y el tiempo de utilidad que la misma puede llegar a

tener. Los resultados fueron corroborados con pruebas realizadas a estos dispositivos y se demostró la validez del modelo numérico.

CFD es utilizado para estudiar la cavitación en válvulas y fenómenos relacionados con éstas, como las fuerzas motrices y patrones de flujo que fueron evaluados por Amirante *et.al.* (2014). Para el caso de las válvulas de control y de cierre Halimi *et.al.* (2012), utilizaron herramientas de simulación para estudiar estos dispositivos y determinaron coeficientes de flujo y resultados semejantes a los experimentales, validando la simulación numérica. La Figura 6 muestra los resultados de la distribución de presión en un corte transversal en la válvula, y las líneas de corriente en todo el volumen de control.

Figura 6. Contorno de presión y líneas de corriente.

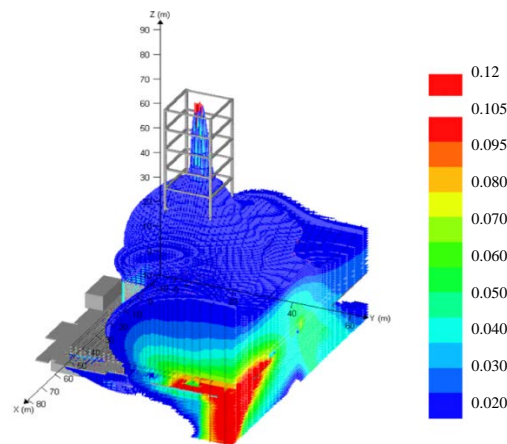


Adaptado de Halimi, *et.al.* (2012).

Por su versatilidad, CFD ha estado presente en diferentes escenarios que involucran el flujo de líquidos y gases, estudiando el comportamiento de acuerdo a las condiciones en las que se encuentran. Tras el fatídico accidente ocurrido en 2011, en las costas del

golfo de México en la plataforma *Deepwater Horizon*, y teniendo en cuenta la información arrojada por las investigaciones, Dadashzadeh *et.al.* (2013) estudiaron el comportamiento de la nube de vapores y la sobrepresión que provocó la explosión. La Figura 7 muestra la simulación de la dispersión de los gases a través de la plataforma con el objetivo de identificar áreas peligrosas para optimizar el diseño de la plataforma.

Figura 7. Concentración de gas a la entrada de ventilación de las salas de máquinas.



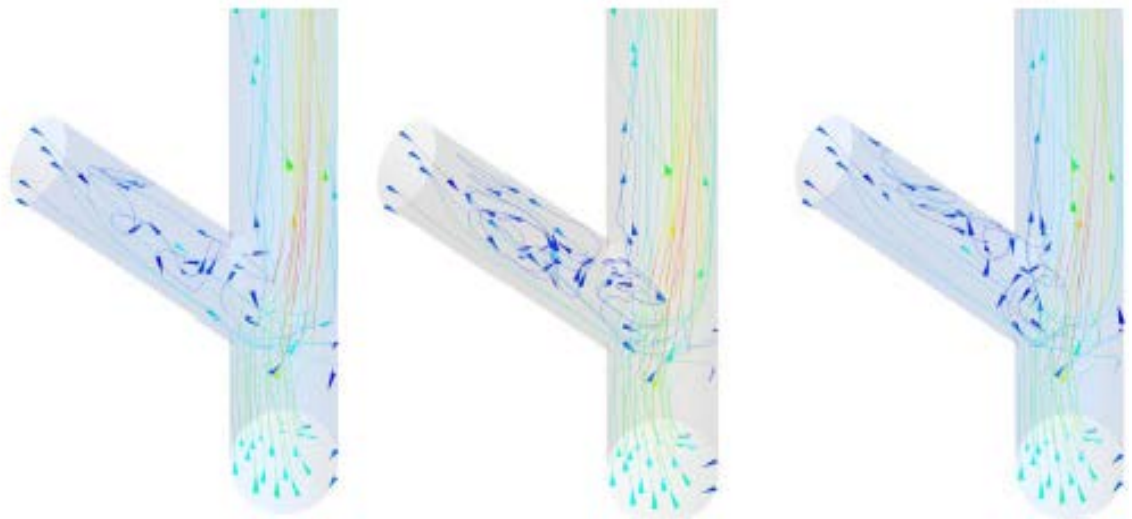
. Adaptado de Dadashzadeh, *et.al.* (2013).

Como se mencionó anteriormente, una de las ventajas más importantes de CFD es, que no se requiere construir prototipos en diferentes escalas para conocer el comportamiento real de un proceso. CFD tiene la capacidad de realizar simulaciones a grandes escalas. González (2012) propuso una metodología para aplicar simulación de grandes escalas (LES) en una unidad de craqueamiento catalítico industrial. Después de obtener resultados a partir de simulaciones realizadas a escala de laboratorio sin reacción química, se llevó a cabo una simulación CFD tridimensional para un reactor FCC, utilizando LES para la fase gaseosa, y el catalizador como fase continua. La Figura 8 muestra las líneas de flujo para el catalizador en el reactor.

En el tratamiento de emulsiones de agua en aceite W/O, CFD ha sido empleado para desarrollar modelos de mezclado. Shideh (2012), analizaron el modelo analítico de CFD y lo compararon con los resultados de pruebas de laboratorio para sistemas tanques de mezclado dispuestos con un impulsor en su interior. Para la simulación fue

utilizado el modelo de turbulencia $k - \varepsilon$ y el modelo multifásico Euleriano – Euleriano. El modelo CFD simulado, fue utilizado para estudiar en detalle el efecto de la velocidad del impelidor, el tipo de aceite, la fracción volumétrica de agua, la distribución y tamaño de las gotas, y la distribución de la fase dispersa.

Figura 8. Diagrama de líneas de corriente para el flujo del catalizador a lo largo del reactor (arriba) y la entrada en la intersección entre las dos entradas del reactor (abajo).



Adaptado de González (2012).

1.5 DILUCIÓN DE CRUDOS

Los crudos pesados son aquellos que presentan gravedad API menor a 15, por lo tanto se requiere de instalaciones especiales para su transporte desde el campo productor a refinerías, por medio de oleoductos. La principal característica de este tipo de crudos es la alta viscosidad, que puede ir desde unos pocos miles, a millones de centipoises (cp) a temperatura ambiente y de yacimiento. Se espera que un oleoducto trabaje con una viscosidad máxima de 400 cp. Una de las soluciones disponibles en la actualidad para cumplir este estándar, es añadir un diluyente para lograr la disminución de la viscosidad. (GATEAU P. *et.al.*, 2004)

Para la realización del presente trabajo, CFD se utilizará para modelar y simular el comportamiento de la dilución de un crudo pesado con nafta, en un mezclador estático. La dilución consiste en la mezcla de un hidrocarburo de baja viscoso tal como, condensados, nafta, kerosene, y crudos livianos; con uno de mayor viscosidad para proporcionar disminución de esta. El principal problema asociado a los diluentes son sus altos costos y la disponibilidad del recurso en las zonas cercanas en las cuales se produce el crudo. El diluyente por excelencia utilizado actualmente en el mundo es el condensado proveniente del gas natural o un hidrocarburo liviano y por lo general constituye el 24% al 50% de la mezcla. (SANIERE *et.al.*, 2004).

Algunas desventajas de usar condensados para la dilución de crudo pesado es la disponibilidad de estos componentes que están asociados con la demanda de gas natural. Otro problema asociado a estos disolventes es que pueden generar la precipitación de asfaltenos conduciendo a una obstrucción parcial o total de las líneas de transporte, por esta razón, se deben conocer las propiedades del crudo al cual se le aplicara el proceso. Otra opción para diluir aceites pesados es utilizar un crudo liviano, con un rango de gravedad API de 35 al 42. Los hidrocarburos livianos son menos eficientes en la reducción de la viscosidad de los aceites pesados que los condensados y presentan los mismos problemas de disponibilidad y compatibilidad con los asfaltenos.

Por lo anterior, la Nafta parece ser una alternativa interesante y la más utilizada para el transporte de crudo pesado en Colombia; debido a la alta gravedad API, y a la eficiencia de dilución que presenta; además de tener buena compatibilidad con los asfaltenos y es fácilmente reutilizable. (GATEAU P *et.al.*, 2004).

El objetivo del presente trabajo es modelar y simular el comportamiento de la dilución de crudo pesado con nafta, en un mezclador estático usando técnicas de CFD, teniendo en cuenta que ésta es útil para el estudio de flujo de fluidos en sistemas de mezclado.

2. MODELAMIENTO MATEMÁTICO

El modelamiento de CFD involucra planteamiento de las ecuaciones de conservación en regímenes de flujo laminar y turbulento, estado estable o transiente. La solución de estos modelos matemáticos necesarios requieren predicciones numéricas. La solución analítica para este tipo de ecuaciones, existe solo para flujos simples en condiciones ideales, por esta razón, buscando dar solución a los problemas de flujos reales, se reemplazan las Ecuaciones por aproximaciones algebraicas que pueden ser resueltas utilizando métodos numéricos. (SANDERSE *et.al.*, 2013). A continuación se muestran las ecuaciones de conservación.

2.1 ECUACIÓN DE CONSERVACIÓN, CONTINUIDAD Y MOMENTO.

La Ecuación de continuidad o balance de masa está representada por la Ecuación (1) y la Ecuación (2) representa la cantidad de movimiento para un fluido incompresible.

$$\nabla \cdot \mathbf{u} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \nabla \cdot (\mathbf{u} \mathbf{u}) = -\nabla p + \nu \nabla^2 \mathbf{u} \quad (2)$$

En un dominio Ω con límites $\Gamma = \partial\Omega$ y se complementará con las condiciones de frontera $\mathbf{u} = \mathbf{u}_b$ en Γ o condiciones límite periódicas y una condición inicial de divergencia $\mathbf{u} = \mathbf{u}_0$.

$$\int_{\partial\Omega} \mathbf{u} \cdot \mathbf{n} d\Gamma = 0 \quad (3)$$

$$\int_{\Omega} \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} d\Omega + \int_{\partial\Omega} \mathbf{u} \mathbf{u} \cdot \mathbf{n} d\Gamma = - \int_{\partial\Omega} p \mathbf{n} d\Gamma + \int_{\partial\Omega} \nu \nabla \mathbf{u} \cdot \mathbf{n} d\Gamma \quad (4)$$

Expresando las Ecuaciones de conservación de masa y momento en el dominio Ω , se debe tener en cuenta que para las condiciones límite periódicas, dichos límites de integración son reemplazados por uno general.

$$\frac{d}{dt} \int_{\Omega} \mathbf{u} d\Omega = 0 \quad (5)$$

2.2 ECUACIÓN DE CONSERVACIÓN DE ENERGÍA.

En fluidos incompresibles la energía se considera una cantidad de conservación secundaria que viene dada a partir de la conservación de la masa y el momento. La Ecuación de energía en su forma integral se deriva tomando como base el producto interno de la Ecuación de momento con una función $v(\mathbf{x}, t)$, integrando en el dominio Ω , donde v satisface la misma condición límite que u . El resultado de la Ecuación escalar es mostrado en la Ecuación (6):

$$\underbrace{\int_{\Omega} \frac{\partial u}{\partial t} \cdot v d\Omega}_{\text{I}} + \underbrace{\int_{\Omega} \nabla \cdot (\mathbf{c}\mathbf{u}) \cdot v d\Omega}_{\text{II}} = - \underbrace{\int_{\Omega} \nabla p \cdot v d\Omega}_{\text{III}} + v \underbrace{\int_{\Omega} \nabla^2 \mathbf{u} \cdot v d\Omega}_{\text{IV}} \quad (6)$$

Las funciones $u(\mathbf{x}, t)$ y $v(\mathbf{x}, t)$ son elementos de $L^2(\Omega)$, las cuales son integrables en el dominio Ω como lo presenta la Ecuación (7):

$$(\mathbf{u}, \mathbf{v}) = \int_{\Omega} \mathbf{u} \cdot \mathbf{v} d\Omega = 0 \quad (7)$$

Con la norma implícita $\|\mathbf{u}^2\| = \int_{\Omega} |\mathbf{u}|^2 d\Omega$. Hasta este punto, se ha introducido una distinción explícita entre la cantidad de convección \mathbf{c} y la cantidad de convección \mathbf{u} , como se mostró en la Ecuación (6). Los términos separados en la Ecuación (6) son establecidos nuevamente con el teorema de divergencia para obtener un número de propiedades importantes. De igual forma el término de convectividad es dado empleando la regla del producto, obteniendo como resultado la Ecuación (8):

$$\nabla \cdot (\mathbf{c}\mathbf{u}) \cdot \mathbf{v} = (\mathbf{u} \cdot \nabla) \nabla \cdot \mathbf{c} + [(\mathbf{c} \cdot \nabla)\mathbf{u}] \cdot \mathbf{v} \quad (8)$$

Consecuentemente se tiene:

$$[\nabla \cdot (\mathbf{c}\mathbf{u})] \cdot \mathbf{v} = \nabla \cdot ((\mathbf{u} \cdot \nabla)\mathbf{c}) - [(\mathbf{c} \cdot \nabla)\mathbf{v}] \cdot \mathbf{u} \quad (9)$$

Para llegar a la segunda parte (II) de la Ecuación (6), se utiliza $\nabla \cdot \mathbf{c} = 0$, se integra sobre el dominio y se integra por partes.

$$\text{II: } \int_{\Omega} [(\mathbf{c} \cdot \nabla)\mathbf{u}] \cdot \mathbf{v} d\Omega = \int_{\partial\Omega} [(\mathbf{u} \cdot \nabla)\mathbf{c}] \cdot \mathbf{n} d\Gamma - \int_{\Omega} [(\mathbf{c} \cdot \nabla)\mathbf{v}] \cdot \mathbf{u} d\Omega \quad (10)$$

En caso de condiciones límite periódico, el límite de integración en la parte derecha desaparece y las Ecuaciones pueden ser escrita teniendo en cuenta el producto interno de la Ecuación (7), obteniendo la Ecuación (11):

$$((\mathbf{c} \cdot \nabla)\mathbf{u}, \mathbf{v}) = -(\mathbf{u}, (\mathbf{c} \cdot \nabla)\mathbf{v}) \quad (11)$$

Esta relación expresa la simetría del operador convectivo y se mantiene si $\nabla \cdot \mathbf{c} = 0$ y las condiciones límite son periódicas. Denotando el operador convectivo como $(\mathbf{c} \cdot \nabla)\mathbf{u} = \mathcal{C}(\mathbf{c})\mathbf{u}$, puede escribirse como aparece en la Ecuación (12).

$$\mathcal{C}(\mathbf{c}) = -\mathcal{C}(\mathbf{c})^* \quad (12)$$

Donde * denota el conjugado hermítico. Consecuentemente, el término convectivo no cambia el flujo total de energía.

$$\mathcal{C}(\mathbf{c}, \mathbf{u}), \mathbf{u} = 0 \quad (13)$$

El tercer término (III) de la Ecuación (6) denota el trabajo hecho por las fuerzas de presión y puede ser expresado como aparece en la Ecuación (14).

$$\text{III: } \int_{\Omega} \nabla p \cdot \mathbf{v} d\Omega = \int_{\partial\Omega} p\mathbf{v} \cdot \mathbf{n} d\Gamma - \int_{\Omega} p\nabla \cdot \mathbf{v} d\Omega \quad (14)$$

Nuevamente, en caso que el límite sea no periódico, o la condición límite de presión sea igual a cero, la Ecuación (14) puede ser escrita como aparece en la Ecuación (15):

$$(\nabla p, \mathbf{v}) = -(p \cdot \nabla \cdot \mathbf{c}) = 0 \quad (15)$$

Estas Ecuaciones expresan la relación entre el operador divergente y gradiente. El último término (IV) de la Ecuación (6), que relaciona la disipación de viscosidad, es denotado en función de $\nabla^2 u \cdot v = \nabla \cdot (v \cdot (\nabla u)^T) - \nabla v : \nabla u$

$$\text{IV: } v \int_{\Omega} \nabla^2 u \cdot v d\Omega = v \int_{\partial\Omega} v \cdot \frac{\partial u}{\partial n} d\Gamma - v \int_{\Omega} \nabla v : \nabla u d\Omega \quad (16)$$

Sin tener en cuenta el término de límite e integración por partes, se obtiene la simetría del operador de difusividad $D(u) = \nabla^2 u$

$$D = D^* \quad (17)$$

Para llegar a la Ecuación total de energía cinética se utilizaron condiciones de límites periódicos y se tomó $c = u, v = u$. Los términos de presión y convectividad desaparecen, las Ecuaciones de energía cinética $k = \frac{1}{2} \|u\|^2$ se muestran en la Ecuación (18).

$$\frac{d}{dt} \int_{\Omega} k d\Omega = v \int_{\partial\Omega} u \cdot \frac{\partial u}{\partial n} d\Gamma - v \int_{\Omega} \nabla v : \nabla u d\Omega \quad (18)$$

En caso de condiciones limite periódicas, el primer término desaparece, entonces se tiene:

$$\frac{dK}{dt} = -v(\nabla u, \nabla u) \quad (19)$$

Donde $K := \int k d\Omega = \frac{1}{2} (u, u)$ y el término en la parte derecha puede ser visto como el producto Frobenius. Teniendo $\nabla u : \nabla u \geq 0$, la Ecuacion (19) muestra que la energia total del flujo decrece debido a la disipacion de las fuerzas viscosas y que los terminos de presión y convectividad no contribuyen.

2.3 MODELO DE TURBULENCIA.

La turbulencia tiene una fuerte influencia en el transporte de masa, momento y calor, por tal motivo los modelos de turbulencia toman un lugar importante en situaciones en

las cuales es necesario predecir el comportamiento del transporte y la dispersión de partículas, funcionando como la solución al problema de cierre de las ecuaciones de conservación. (PEYRET 2004).

Dentro de los modelos de turbulencia encontrados en la literatura, están el modelo Spalart – Allmaras (SA), K-ε RNG (Re-Normalization Group) y k-ω SST (Shear Stress Transport). Estos tres modelos de turbulencia han sido desarrollados con base en las Ecuaciones de Reynolds y Navier-Stockes y modelados a partir de una relación lineal constitutiva. Estos modelos de turbulencia, pertenecen a subclases de acuerdo al tipo de Ecuaciones que resuelven. El modelo SA pertenece a la subclase de modelos de una Ecuación, generalmente Ecuaciones de energía cinética turbulenta; por el contrario los modelos K-ε RNG y κ-ω SST pertenecen a la subclase de modelos de dos ecuaciones que da solución a una segunda variable de transporte como la disipación turbulenta ε y disipación específica ω. (ZANINO *et.al.*, 2013). Los modelos de turbulencia más usados en el flujo de fluidos con alto número de Reynolds son los modelos de dos Ecuaciones, los cuales tienen como función darle cierre al sistema de ecuaciones de Navier – Stockes y son normalmente conocidos como modelos RANS (Reynolds Averaged Navier – Stokes).

El modelo de turbulencia κ-ε, que pertenece a los modelos de dos Ecuaciones es uno de los más utilizados en CFD y su formulación es generalmente conocida como modelo estándar K-ε. Para el desarrollo de este modelo se especifican dos Ecuaciones de transporte de energía cinética K y disipación ε: (BALABEL *et.al.*, 2010).

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{r^\alpha \partial X_j}(r^\alpha \rho U_j k) = \frac{\partial}{r^\alpha \partial X_j} r^\alpha \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial X_j} \right] + \rho(P_k - \varepsilon) \quad (20)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{r^\alpha \partial X_j}(r^\alpha \rho U_j \varepsilon) = \frac{\partial}{r^\alpha \partial X_j} r^\alpha \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial X_j} \right] + \rho(C_{1\varepsilon} P_k - C_{2\varepsilon} \varepsilon) \frac{\varepsilon}{k} \quad (21)$$

Donde la energía cinética P_k es definida como:

$$P_k = v_t \left(\frac{\partial U_i}{\partial X_j} + \frac{\partial U_j}{\partial X_i} \right) \frac{\partial U_i}{\partial X_j} \quad (22)$$

Donde ν_t es definido como μ_t/ρ y la viscosidad turbulenta μ_t se denota como:

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (23)$$

Los valores de las constantes empíricas son:

$$C_\mu = 0.09 \quad C_{2\varepsilon} = 1.92 \quad C_{1\varepsilon} = 1.44 \quad \sigma_k = 1 \quad \sigma_\varepsilon = 1.3$$

Donde k es la energía cinética turbulenta, P_k es la producción de energía cinética turbulenta, r es la distancia radial, $\left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i}\right)$ hace referencia al tensor principal, ρ es la densidad del fluido, μ es la viscosidad laminar, μ_t viscosidad turbulenta, ν_t es la viscosidad cinemática turbulenta, U es la velocidad de salida uniforme. Los modelos de turbulencia tipo RANS de dos ecuaciones (SST, κ - ε y κ - ω) son ampliamente utilizados debido a que proporcionan una relación costo – beneficio computacional, que resulta ser favorable para el modelamiento de turbulencia, es decir, presentan un bajo costo computacional dando la posibilidad de tener un alto grado de modelamiento.

2.3.1 Modelo Shear Stress Transport (SST)

El modelo de turbulencia escogido para el desarrollo del presente trabajo fue el modelo SST (The Shear Stress Transport Model). Este modelo fue seleccionado para dar solución general al problema de cálculo cerca de las zonas en las que se presentan cambios en los gradientes de cada una de las variables del sistema. El modelo SST trabaja resolviendo la frecuencia de remolinos basado en el modelo κ - ω en la pared, y κ - ε en el interior del flujo. Esta relación de dos modelos de turbulencia garantiza una buena transición de los modelos y una buena predicción en la estimativa de remolinos. (MENTER F.R. 1994)

El modelo SST está representado por las ecuaciones 24 y 25.

$$\rho \left(\frac{\partial k}{\partial t} + \frac{\partial k}{\partial x_i} \right) = P_k - \beta^* \rho k \Omega + \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_i} \right] \quad (24)$$

$$\rho \left(\frac{\partial \Omega}{\partial t} + \vec{U} \frac{\partial \Omega}{\partial x_i} \right) = \alpha \rho S^2 + \beta \rho \Omega + \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\omega} \right) \frac{\partial \Omega}{\partial x_i} \right] + 2(1 - F_1) \rho \sigma_{\omega 2} + \frac{1}{\Omega} \frac{\partial k}{\partial x_i} \frac{\partial \Omega}{\partial x_i} \quad (25)$$

Donde k representa la energía cinética turbulenta, \vec{U} hace referencia al vector velocidad en la dirección i , x_i es la coordenada cartesiana, P_k es la producción de energía turbulenta, β^* y β son constantes con valores de 0,09 y 0,075 respectivamente, Ω es la frecuencia turbulenta, μ_t hace referencia a la viscosidad dinámica turbulenta, α es la constante del modelo SST, S representa la tasa de deformación, σ_k , σ_ω y $\sigma_{\omega 2}$ son constantes con valores de 1, 0.5 y 0.856 respectivamente y F_1 es la función de combinación.

2.4 MÉTODOS NUMÉRICOS.

Para resolver las ecuaciones de conservación y ecuaciones de cierre de CFD es necesario la utilización de métodos numéricos para discretización de las ecuaciones diferenciales parciales. Dependiendo de las condiciones a las que se esté trabajando y la interacción entre las fases en el sistema a analizar, es conveniente la selección de un método numérico para solucionar dichas Ecuaciones.

La **Tabla 2** ilustra las aplicaciones de los métodos numéricos para dar solución al conjunto de ecuaciones de cierre de CFD, teniendo en cuenta las diferentes áreas industriales y el tipo de flujo utilizado.

2.4.1 Método de los Volúmenes Finitos: Existen diversos métodos numéricos para el desarrollo de las Ecuaciones de flujo, siendo los más utilizados: I) El método de diferencias finitas, el cual se utiliza principalmente para el desarrollo de ecuaciones diferenciales y geometrías simples; II) El método de elementos finitos, es empleado comúnmente sobre la solución de los otros métodos debido a los pocos supuestos que se deben hacer en el momento de solucionar el conjunto de ecuaciones (PERVAIZ

et.al., 2014), y se aplica en problemas estructurales, los cuales requieren soluciones sencillas, y en geometrías moderadamente complejas (MÖHRING *et.al.*, 2012); III) El método de los volúmenes finitos, es el más robusto y complejo cuando se pretende hacer simulación en superficies libres, y la principal ventaja de este método es la forma como se hace la discretización espacial, realizada directamente sobre el espacio físico, permitiendo que sea el método más flexible frente a geometrías más complejas (SINGAL *et.al.*, 2014), razón por la cual el método de volúmenes finitos se considera la base de ANSYS CFX, herramienta computacional que será utilizada para el desarrollo del presente trabajo.

El método de volúmenes finitos fue explicado por Maliska, C.R. (1995) y consiste básicamente en la división de la geometría a ser estudiada en pequeños volúmenes de control, es decir, se genera una malla numérica. Las ecuaciones aproximadas son obtenidas a través del balance de conservación de masa, cantidad de movimiento y energía. Los valores son calculados en regiones discretas de la geometría. El término “volumen finito” hace referencia a un volumen que encierra un punto nodal en la malla.

En el método de los volúmenes finitos, las ecuaciones de conservación son integradas en el volumen de control. Para este método, las ecuaciones diferenciales que contienen términos divergentes son convertidas en integrales de superficie a partir del teorema de Gauss, el cual es representado en las Ecuaciones (26) y (27)

$$\int_V \nabla\phi dV = \int_A \phi \vec{n} dA \quad (26)$$

$$\int_A \rho\phi \vec{n} \vec{v} dA = \int_A \Gamma\phi \vec{n} dA + \int_V A\phi dV \quad (27)$$

La ecuación de conservación global es obtenida a través de una suma de las celdas, de modo que las integrales sobre las superficies internas se cancelan. El flujo líquido a través del volumen de control es una suma de integrales sobre las caras.

Tabla 2. Aplicaciones de CFD – Métodos de solución.

AUTOR	INDÚSTRIA APLICADA	MÉTODO NUMÉRICO	FLUJO
MIYATA, Hideaki; <i>et.al.</i> (2014)	Diseño de carcasa para Barcos de Vela	Volúmenes Finitos	Sólido-líquido (Carcasa de Barco-Agua)
PERVAIZ, Salman; <i>et.al.</i> (2014)	Determinación de la temperatura de una herramienta de corte	Elementos Finitos	Sólido-Gas (herramienta de corte-aire)
SINGAL, Vaibhav; <i>et.al.</i> (2014)	Análisis de un tanque de combustible Kerosene	Volúmenes Finitos	Sólido-Gas (Tanque de Kerosene-Kerosene)
SUN, Zhonghua y XU, Lei. (2014)	Dinámica de Fluidos en la Arteria Coronaria	Elementos Finitos	Sólido-Líquido (Arteria-Sangre)
SHUANBAO, Yao; <i>et.al.</i> (2014)	Diseño de elementos aerodinámicos de los trenes de alta velocidad	Volúmenes Finitos	Sólido-Gas (Aire- Elemento aerodinámicos)
JOVANOVIĆ, Aca; <i>et.al.</i> (2014)	Flujo granular en mezcladores estáticos	Diferencias Finitas	Sólido –Gas (Mezclador estático, partículas- Aire)
BARAILLER, Fabien; <i>et.al.</i> (2006)	Mezclador de rotor para fluidos viscosos	Elementos Finitos	Líquido-Sólido

Las Ecuaciones (28) y (29) representan el flujo convectivo y difusivo, respectivamente:

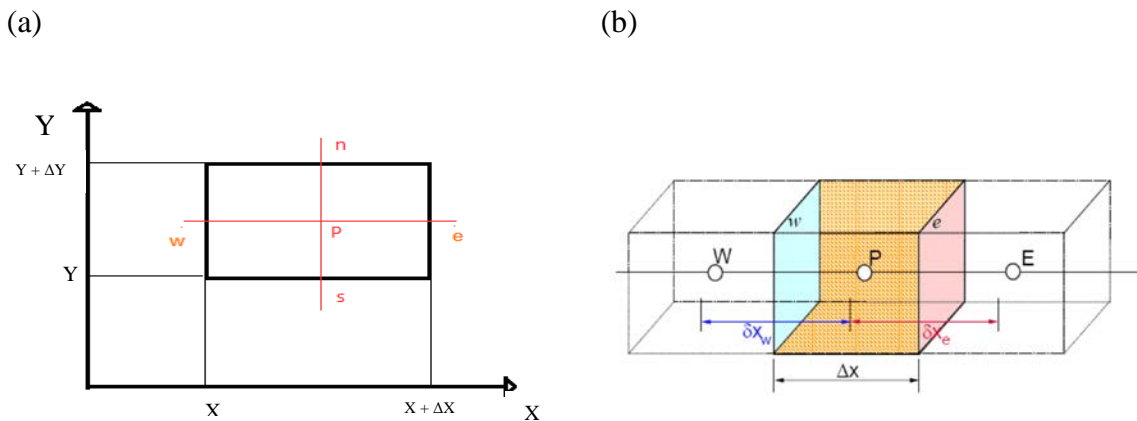
$$\int_A \rho \phi \vec{n} \vec{v} dA = \sum_l \int_A \rho \phi \vec{n} \vec{v} dA \quad (28)$$

$$\int_A \Gamma \phi \vec{n} dA = \sum_l \int_A \Gamma \phi \vec{n} dA \quad (29)$$

Para dar solución a las integrales de superficie es necesario conocer el valor del integrando. En el caso en que ese valor no se tenga, y que solo se tiene el valor en el centro del volumen de control, el esquema de interpolación debe definir las propiedades de las caras. Las caras reciben el nombre de los puntos cardinales (n – norte, s – sur, w – oeste, e – este) y el punto nodal es representado por la letra P.

La Figura 9 presenta un volumen de control rectangular, el cual es utilizado para ilustrar una discretización de una ecuación de transporte usando la formulación de volúmenes finitos.

Figura 9. Volumen de Control. a. Volumen Finito Bidimensional. b. Tres volúmenes de control con tres puntos nodales (W, P y dos interfaces (w y e)).

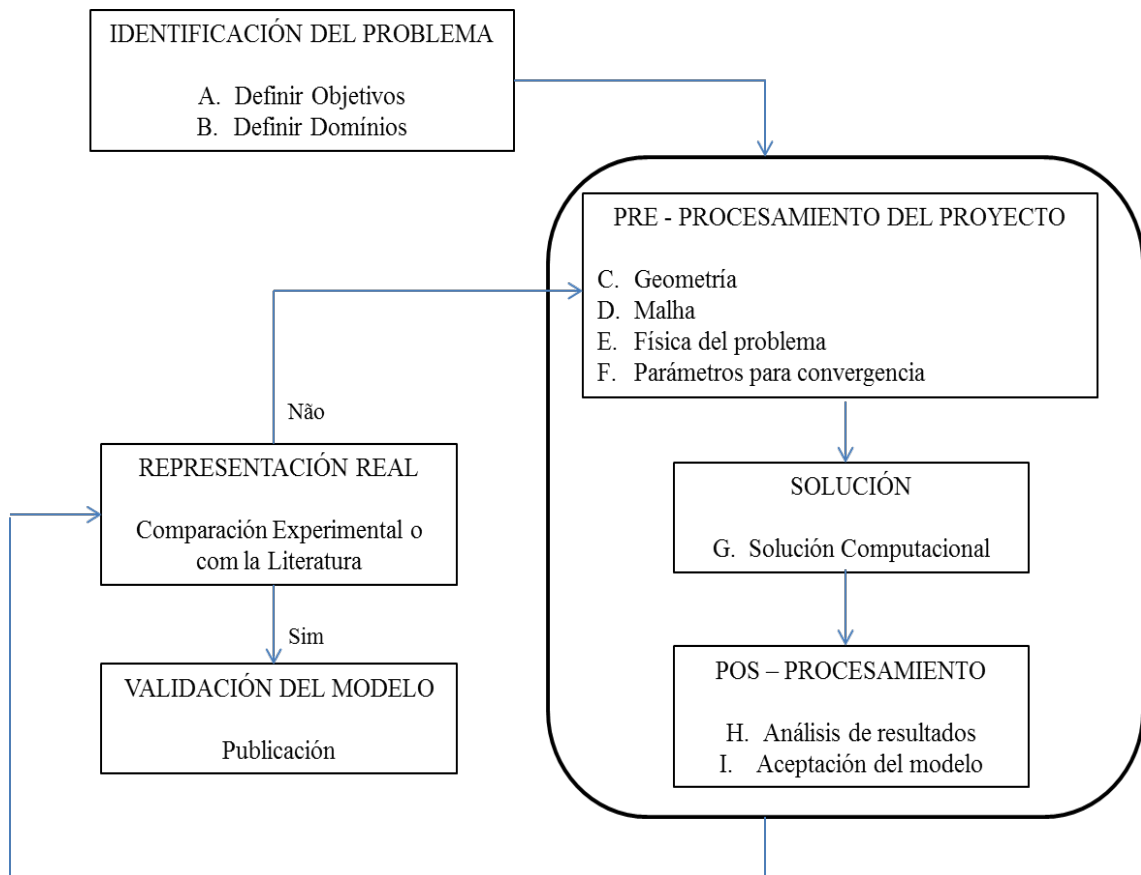


Adaptado de Alvarez-Helver (2011).

3. METODOLOGÍA COMPUTACIONAL

En la metodología computacional se muestran los procedimientos numéricos del desarrollo de las simulaciones. Las simulaciones realizadas en CFD, tienen una metodología basada en cuatro pasos principales: I) Identificación del problema, II) Pre – procesamiento del proyecto, III) Solución numérica del modelo y (IV) Pos – procesamiento. La Figura 10 muestra el esquema de los pasos a seguir en el desarrollo de una simulación CFD.

Figura 10. Metodología Computacional.



Adaptado de Alvarez-Helver (2014).

3.1 IDENTIFICACIÓN DEL PROBLEMA

En el presente trabajo se estudiará el comportamiento fluido dinámico de la mezcla de dos hidrocarburos de diferentes gravedades API. Los fluidos serán mezclados en un mezclador estático, con el objetivo de hacer un análisis cualitativo de la homogenización.

Para darle solución al problema es necesario plantear objetivos claros para llegar de esta forma a una respuesta rápida y concisa. El objetivo principal en este trabajo es el modelamiento y simulación numérica del proceso de mezcla de dos fluidos con diferencias considerables en su densidad y viscosidad, en un mezclador estático. Otro de los parámetros que deben ser tenidos en cuenta para llegar a la solución final es la definición del dominio. Los dominios que se consideran en el desarrollo del modelo tienen como objetivo la simplificación, tanto del tiempo computacional como de la complejidad de la creación del modelo.

3.2 PRE – PROCESAMIENTO DEL MODELO

En el pre – procesamiento del modelo, el punto de partida es el diseño de la geometría, la cual se realiza con ayuda de una herramienta CAD, con el propósito de definir todas las entradas y salidas del sistema. Posterior a la creación de la geometría, está la construcción de la malla, la cual es necesaria para los métodos numéricos y finalmente se tienen los parámetros de convergencia. La geometría del mezclador estático fue realizada con la ayuda de la herramienta de diseño *Desing Modeler*. Esta geometría es mostrada en la Figura 11. La elección del mezclador estático fue realizada a partir de la clasificación encontrada en Thakur *et.al.* (2003). En esta clasificación, se destaca el mezclador estático tipo LPD (*Low Drop Pressure*) para el tratamiento de hidrocarburos en régimen turbulento. El dispositivo diseñado tiene 9 pulgadas de diámetro interno y una relación L/D (relación de diámetro a longitud) de 12.

Las especificaciones geométricas del mezclador estático se relacionan en la Tabla 3. De acuerdo a la geometría realizada, se obtuvieron las mallas, mostradas en la Figura 11. Las características de la malla se presentan en la Tabla 4.

Tabla 3. Especificaciones Geométricas

CARACTERISTICAS	VALOR
Diámetro Interno (pulgadas)	9
Longitud (m)	2.286
Rotación de los elementos	90° (Uno respecto del otro)

Tabla 4. Características de la malla.

CARACTERISTICAS	VALOR
Número de Elementos	952,202
Número de Nodos	528,137
Número de Nodos en la Camada Limite	5
Razón de Crecimiento	1.3

Después de tener la geometría y malla construidas, se debe determinar la física del problema, que corresponde a definir todos los modelos y condiciones que serán utilizadas en la simulación. Para el desarrollo de esta simulación fue utilizado un modelo transiente, el cual permite una evaluación del comportamiento de la mezcla a través del tiempo. Los fluidos utilizados son alimentados en dos entradas concéntricas y posteriormente son mezclados por los elementos fijos en el interior del dispositivo. Las propiedades de los fluidos utilizados se encuentran en la Tabla 5. Estas propiedades fueron tomadas de Ecopetrol¹.

¹ Recuperado el 14 de agosto de 2015 http://www.ecopetrol.com.co/documentos/64629_ANEXO_No.1_ALCANCE_DEL_SERVICIO.pdf

Figura 11. Geometría del mezclador estático LPD (Low Drop Pressure)

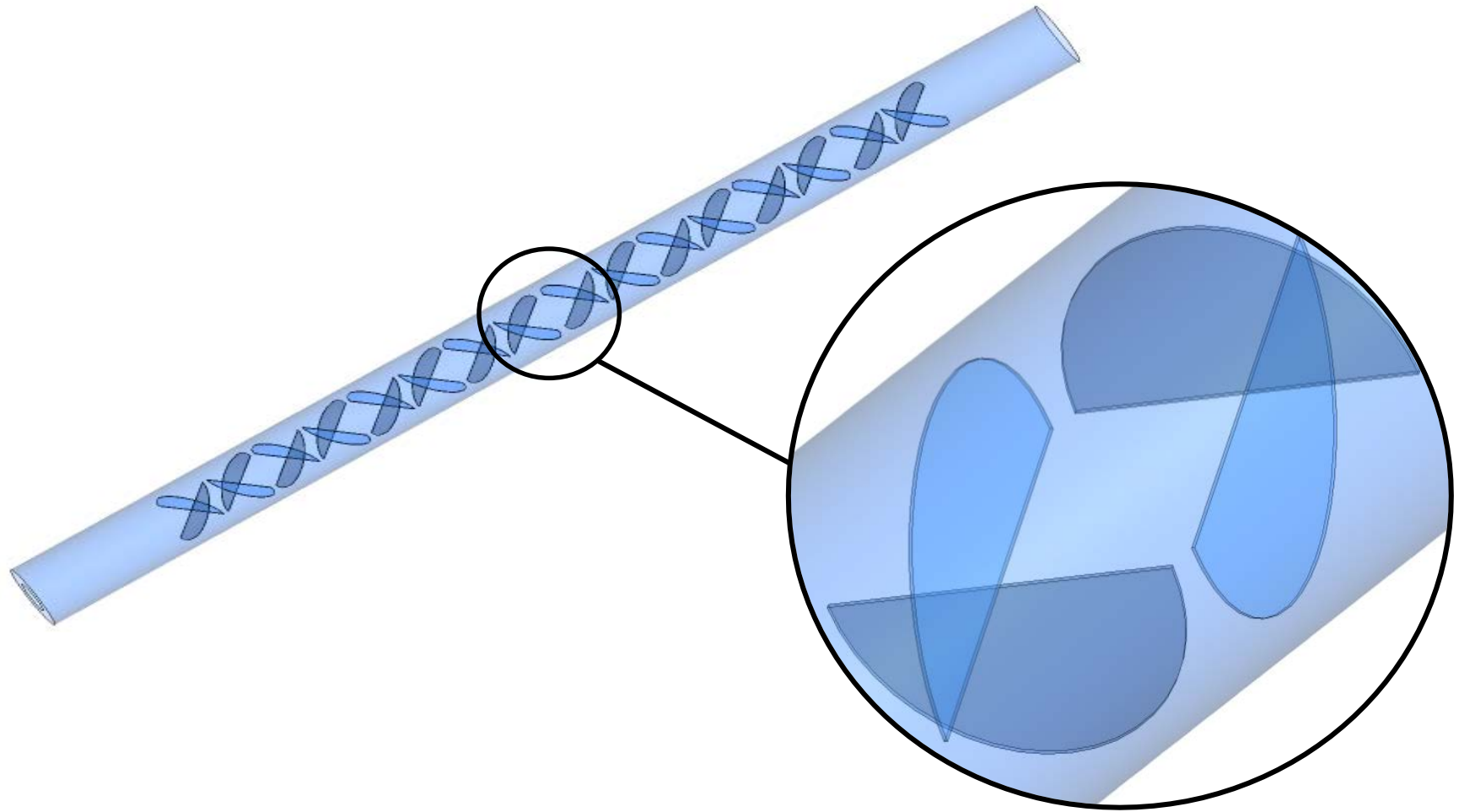
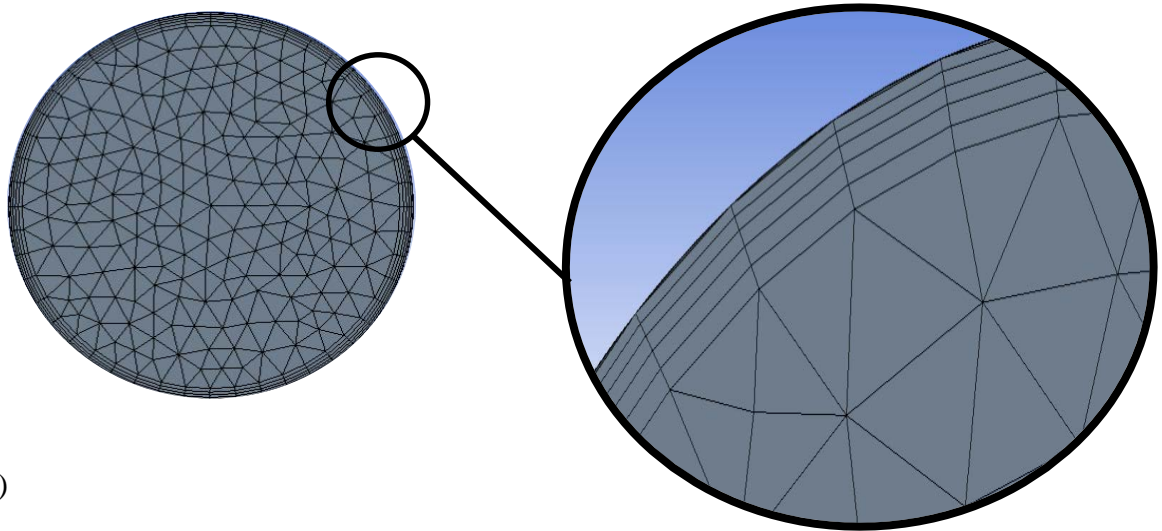
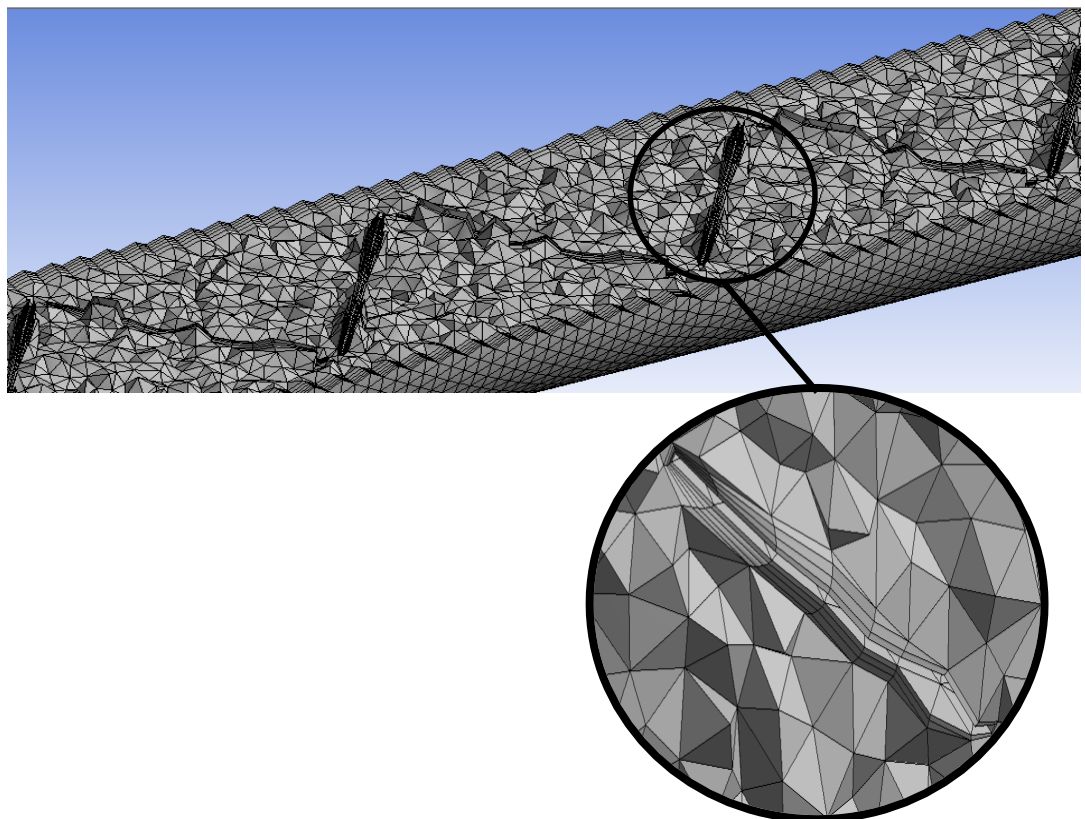


Figura 11. Malla Tetraédrica. a. Prismas en la pared del tubo. b. Corte transversal. Prismas en los elementos de mezclado.



(a)



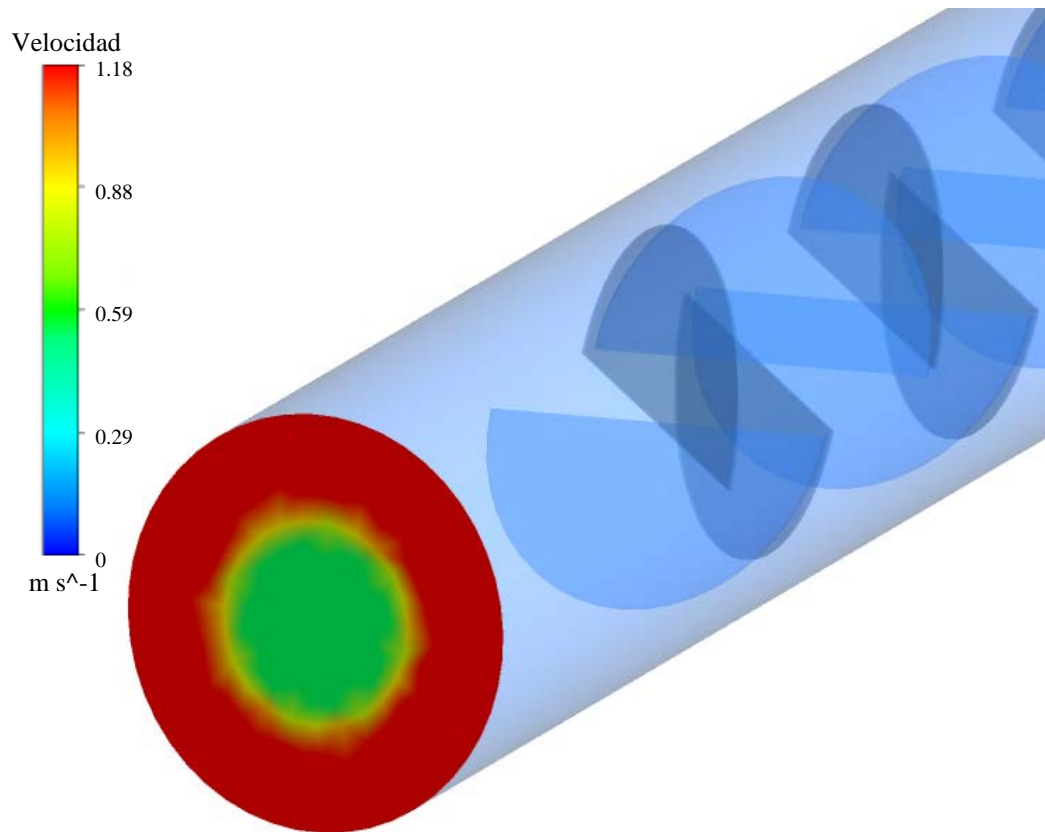
(b)

Tabla 5. Propiedades de los Fluidos

CARACTERÍSTICAS	CRUDO PESADO	NAFTA
Viscosidad (cP)	390,577	1.1288
Densidad (kg/m ³)	1,003.94	717.5
API	7.8	58
Capacidad Calorífica (J/Kg°k)	153.24	1,036.65
Conductividad Térmica (Wm ⁻¹ k ⁻¹)	0.1326	0.1116
Flujo de entrada (bls/d)	20,000	2,800
Velocidad (m/s)	1.18	0.53

Dentro de las condiciones de contorno para la simulación se tiene la velocidad de entrada, presión a la salida del mezclador, densidad y viscosidad de los componentes a ser mezclados. Teniendo en cuenta que los fluidos entran de forma concéntrica por dos partes distintas, la velocidad de los mismos será diferente y constante. El campo de velocidades a la entrada del mezclador puede ser observado en la Figura 12.

Figura 12. Campo de velocidades a la entrada del mezclador.



La condición de contorno de presión a la salida del dispositivo es igual a cero y los valores de densidad y viscosidad fueron calculados asumiendo que la mezcla de los fluidos es ideal e independiente de la fracción másica de los componentes.

Para finalizar la etapa de pre – procesamiento, se deben especificar los parámetros de convergencia. Una solución se puede considerar con un alto grado de exactitud a partir de un límite definido, es decir, de un criterio de convergencia. Una de las opciones para el criterio de convergencia es admitir que el residuo global de la simulación es menor a un límite, por ejemplo 1×10^{-3} . Llegar a la convergencia de la solución, en algunas situaciones resulta difícil debido a factores que puede influir en la estabilidad de dicha convergencia, por ejemplo, condiciones de contorno, modelo de turbulencia y esquema de discretización, condiciones iniciales, etc. Para el desarrollo del presente trabajo se considera un residuo global de 1×10^{-4} . Para llegar a este límite de convergencia es necesario utilizar un modelo transitorio.

La Tabla 6 resume las especificaciones de tiempo utilizadas por el modelo en la simulación. Los cálculos se realizaron en un computador con características específicas, las cuales se relacionan en la Tabla 7.

Tabla 6. Tiempo de simulación.

CARACTERÍSTICAS	VALOR
Δt (s)	0.001
Tiempo Simulado (s)	6

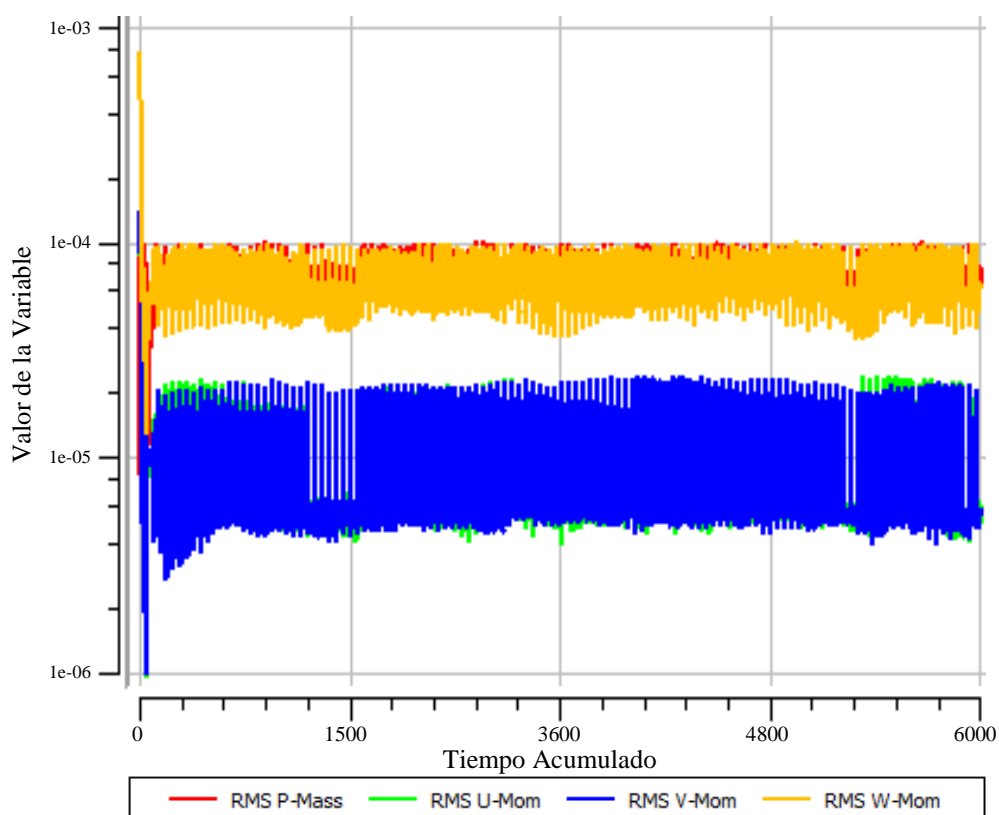
Tabla 7. Características del Computador

CARACTERÍSTICAS	VALOR
Procesador	Intel(R) Core(TM) i7-3770 CPU @ 3.4GHz 3.9GHz
Memoria RAM	8 GB
Tipo de Sistema	Sistema operacional de 64 Bits
Tiempo Estimado de Simulación	7 días

3.3 SOLUCIÓN

Cuando se tiene el problema definido, el paso posterior es la solución del mismo con ayuda del Solver y el uso del Método de Volúmenes Finitos. A partir del pre procesamiento, ANSYS CFX provee la solución a todas las ecuaciones necesarias para realizar la simulación del problema que se ha especificado. El tiempo en esta fase de modelamiento es mayor. Las gráficas de residuo son continuamente mostradas durante la solución del problema, mostrando la convergencia de la misma. La solución para el *set up* correspondiente a la geometría del mezclador estático con los datos especificados, es mostrada en la Gráfica 1. En ella se observa que la convergencia alcanza el criterio establecido de 1×10^{-4} , el cual es aceptable para casos de ingeniería.

Gráfica 1. Monitores de RMS para balance de masa y momento para el mezclador estático LPD.



3.1 PÓS – PROCESAMIENTO

Esta etapa permite verificar el comportamiento fluido dinámico del sistema. En esta fase se tienen diferentes opciones para visualizar las variables de interés detalladamente, permitiendo analizar y comparar los resultados del proceso de una mejor forma. Para el estudio y comprensión del comportamiento de las variables de interés, ANSYS post CFX 14.0 tiene herramientas para el adecuado procesamiento de los resultados.

4. ANALISIS DE RESULTADOS

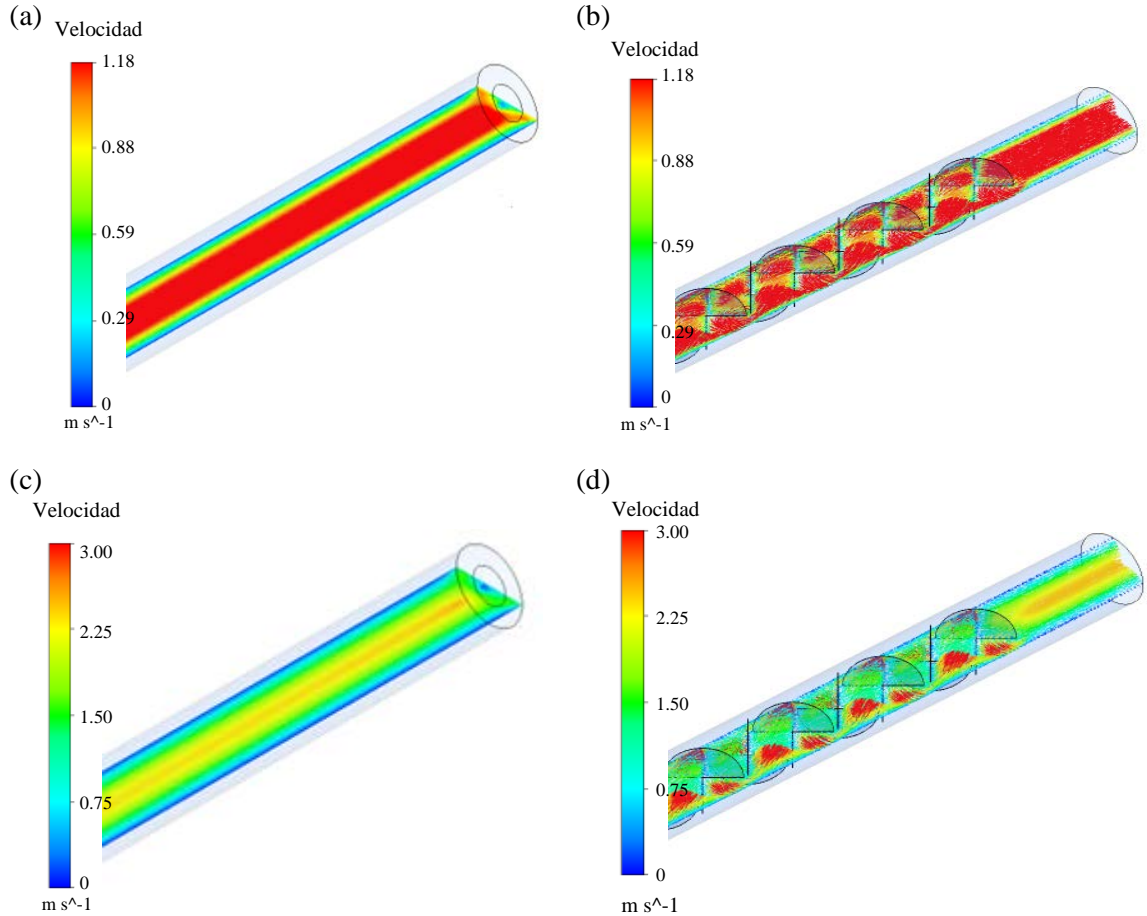
En este capítulo serán mostrados y analizados los resultados obtenidos a partir de las simulaciones realizadas para el proceso de mezclado de fluidos. Dicho estudio fue elaborado de acuerdo a la metodología propuesta en el capítulo anterior. En la primera parte de este análisis, se estudiaron parámetros de velocidad, concentración y caída de presión de la mezcla crudo pesado – nafta y en la segunda parte, como anexo a este trabajo, se realizó un análisis para el pentanol y etanol, dos solventes que están en investigación para ser utilizados en dilución de crudos.

4.1 PERFILES DE VELOCIDAD

La Figura 13 muestra el campo de velocidades para la mezcla crudo pesado – nafta a través de un tubo liso mostrado en la Figura 13.a) y la geometría del mezclador estático escogido mostrado en la Figura 13.b). En el tubo liso, se observa que el perfil comienza con una velocidad de 0.53 m/s y 1.18 m/s respectivamente en las entradas del tubo. La mayor velocidad de 1.18 m/s corresponde al crudo pesado y la de 0.53 m/s corresponde a la nafta. Las velocidades alcanzan un valor constante rápidamente, presentando las mayores velocidades en el centro de la tubería, las cuales son representadas por el color rojo y velocidades más bajas tendientes a cero en las paredes del tubo, representadas por la gama de colores azules.

Las Figura 13.c) y 14.d) muestran el mismo perfil de velocidad para un tubo liso y una tubería con mezclador estático a una escala de velocidades más altas, llegando hasta 3 m/s. En estas figuras, se observa de forma detallada el aumento de la velocidad en el momento en que los fluidos tienen contacto con los deflectores a través de la tubería. Teniendo en cuenta que las menores velocidades presentes en el mezclador oscilan alrededor de 0.59 m/s podemos inferir que no se presenta estancamiento o acumulación de fluidos a lo largo de recorrido.

Figura 13. Perfil Longitudinal de Velocidades. a) Tubo Liso $V_{m\acute{a}x}=1.18$. b) Mezclador DLP $V_{m\acute{a}x}=1.18$. c) Tubo Liso $V_{m\acute{a}x}=3$. d) Mezclador DLP $V_{m\acute{a}x}=3$.

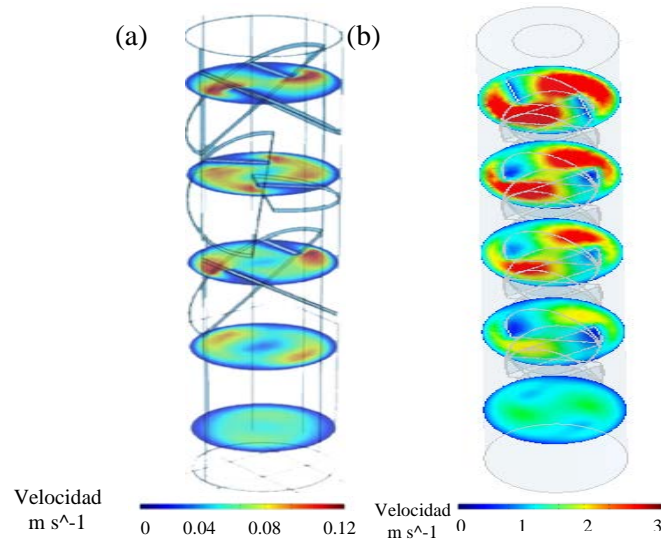


La Figura 14 presenta el perfil transversal de la variación de velocidad para el mezclador estático LPD, con rangos de velocidades de 0 – 0.12 m/s en la Figura 14.a, obtenidos por Jeovanic *et.al*, y 0 – 3 m/s en la Figura 14.b, logrados en las simulaciones del presente trabajo. A partir de los resultados es posible comparar los perfiles de velocidad visualizando que la velocidad en ambos casos tiende a ser constante en el centro de la tubería, a medida que los fluidos se van mezclando en su recorrido a través del mezclador. Teniendo en cuenta lo mencionado anteriormente, es posible afirmar que el modelo matemático desarrollado para este mezclador y los resultados obtenidos con su aplicación son acordes a los encontrados en la literatura.

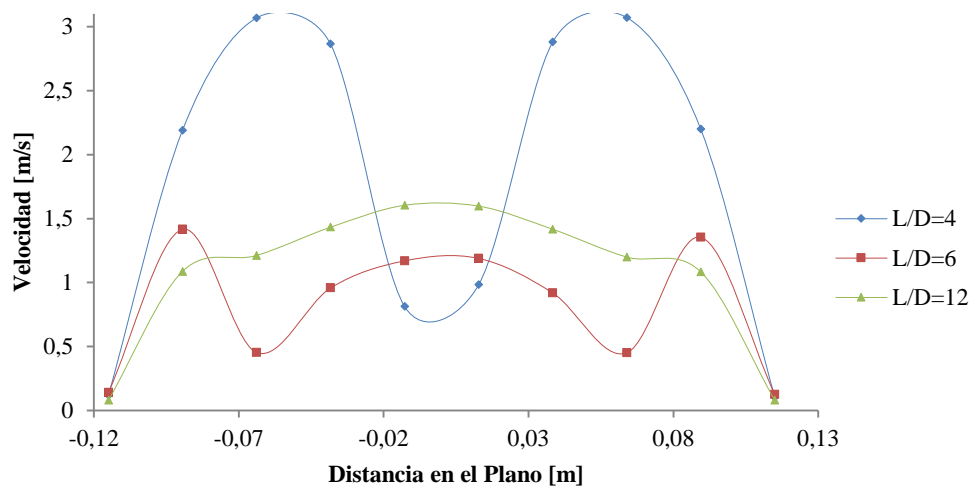
La Gráfica 2 muestra la distribución de velocidad para cada plano en sus respectivas relaciones $L/D= 4, 6$ y 12 . El primer plano, correspondiente a la relación $L/D=4$,

presenta cambios drásticos en el perfil teniendo en cuenta que los fluidos se están empezando a mezclar, por tanto la velocidad de cada uno es diferente y constante, llegando a velocidades máximas de 3.07 m/s y mínimas de 0.6 m/s y 0 m/s en la pared de la tubería. En el segundo plano, para la relación $L/D=6$, se observa que el perfil de velocidad es un poco más suave, sin embargo, aun presenta variaciones considerables con velocidades máximas de 1.4 m/s. El perfil para la relación $L/D=12$, que corresponde al plano de salida del mezclador estático, presenta menos variaciones drásticas y muestra una velocidad máxima de 1.6 m/s en el centro del tubo, indicando que los fluidos se han mezclado y presentan una velocidad uniforme.

Figura 14. Perfil Transversal de Velocidad.



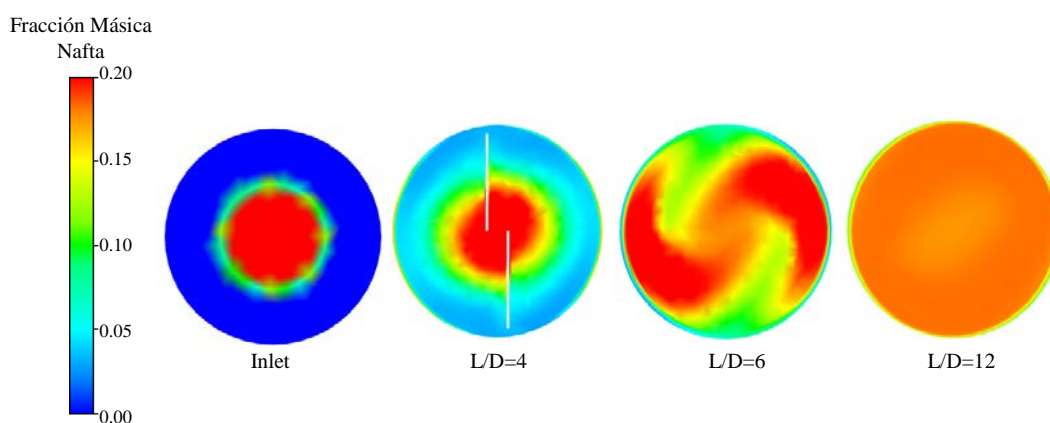
Gráfica 2. Distribución de Velocidad.



4.2 PERFILES DE FRACCIÓN MÁSCICA

La eficiencia de mezclado es un criterio fundamental para el desarrollo de mezcladores estáticos (GHANEM *et.al.*, 2013), el cual puede ser evaluado a partir de los perfiles de fracción másica, en los que se observa con claridad cuál es la distribución de las concentraciones en planos a través del dispositivo.

Figura 15. Perfiles Transversales de Fracción Másica para Nafta.

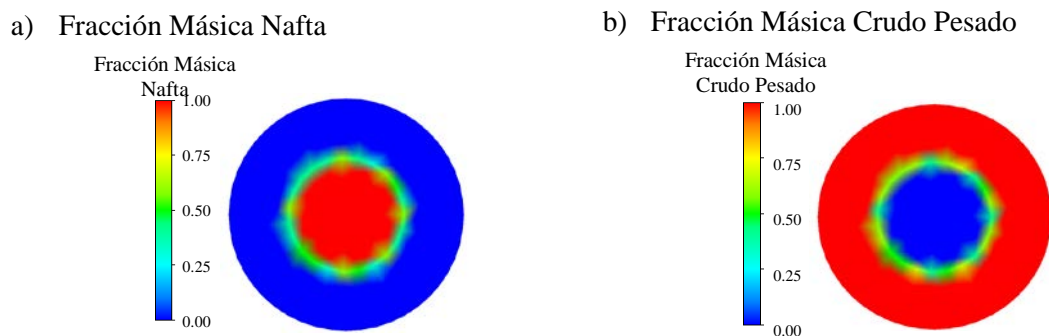


Estudios realizados por Joaquim *et.al* (2011) y Meijer *et.al* (2011) indican que la eficiencia de mezclado está dada por la variación de fracción másica en la salida y para que dicha eficiencia se considere aceptable en términos industriales, debe ser baja; por tal motivo, el plano de salida debe mostrar bajos cambios de concentración. En sentido gráfico, el plano de salida debe, exhibir en su mayoría, un solo color, lo que indica baja variación en la mezcla.

La Figura 15 muestra los perfiles transversales de fracción másica para la Nafta en las relaciones $L/D=4$, $L/D=6$, $L/D=12$. A medida que se avanza en longitud y los elementos del mezclador van aumentando, la homogenización de los fluidos se muestra más clara, debido al movimiento caótico entregado al fluido por los múltiples elementos fijos. En esta figura, la gama de colores presentes permite hacer una evaluación cualitativa de la mezcla de fluidos. En el plano de entrada, el color rojo representa la máxima concentración del componente que se está analizando, en este caso, la nafta y el color azul representa la mínima cantidad del mismo componente. De igual forma, esta mínima cantidad de nafta representa la máxima cantidad de crudo pesado presente en la

entrada del dispositivo, es decir, que al graficar la fracción másica del crudo pesado, la mínima cantidad de nafta representada por el color azul en esta figura, pasaría a ser máxima cantidad de crudo pesado representada por el color rojo. Este comportamiento se puede observar en la Figura 16. El plano para la relación $L/D=4$ y $L/D=6$, permite evaluar el estado de la mezcla dentro dispositivo a una distancia de 0,91 metros y 1,37 metros respectivamente. A partir de estos planos es posible observar el progreso de la mezcla, debido a la homogenización que está presentando. Para la relación $L/D=4$ la variación de la fracción másica en todo el plano es alta, esta cambia entre 0,05 y 0,2, comparada con el plano para la relación $L/D=6$, en el cual la fracción másica oscila entre 0,1 y 0,2. El plano de salida ($L/D=12$), muestra finalmente el estado de la mezcla. A partir de este, es posible inferir que la variación de concentraciones es baja. Este cambio en la concentración es evaluada a partir del código de colores presente, el cual determina que las concentraciones en el plano de salida varían entre 0,15 y 0,2. Teniendo en cuenta que la variación de concentraciones que se presenta es baja, se establece que la calidad de mezclado es buena. La Gráfica 3 muestra los perfiles de concentración, en los cuales se pueden observar sus respectivas variaciones y corroborar la información obtenida a partir de los perfiles transversales. Como era de esperarse, la curva morada correspondiente al plano de salida ($L/D=12$) es la que exhibe una menor variación de concentración, razón por la cual se afirma que la muestra presenta una calidad aceptable en términos industriales. La Figura 17 muestra los perfiles de fracción másica en la salida para un mezclador estático de escama doble (Joaquim *et.al* (2011)), con los resultados obtenidos para el mezclador estático desarrollado en esta investigación.

Figura 16. Perfiles Transversales de Fracción Másica a la Entrada del Mezclador Estático. a) Nafta. b) Crudo Pesado.



Gráfica 3. Distribución de Concentración de Nafta

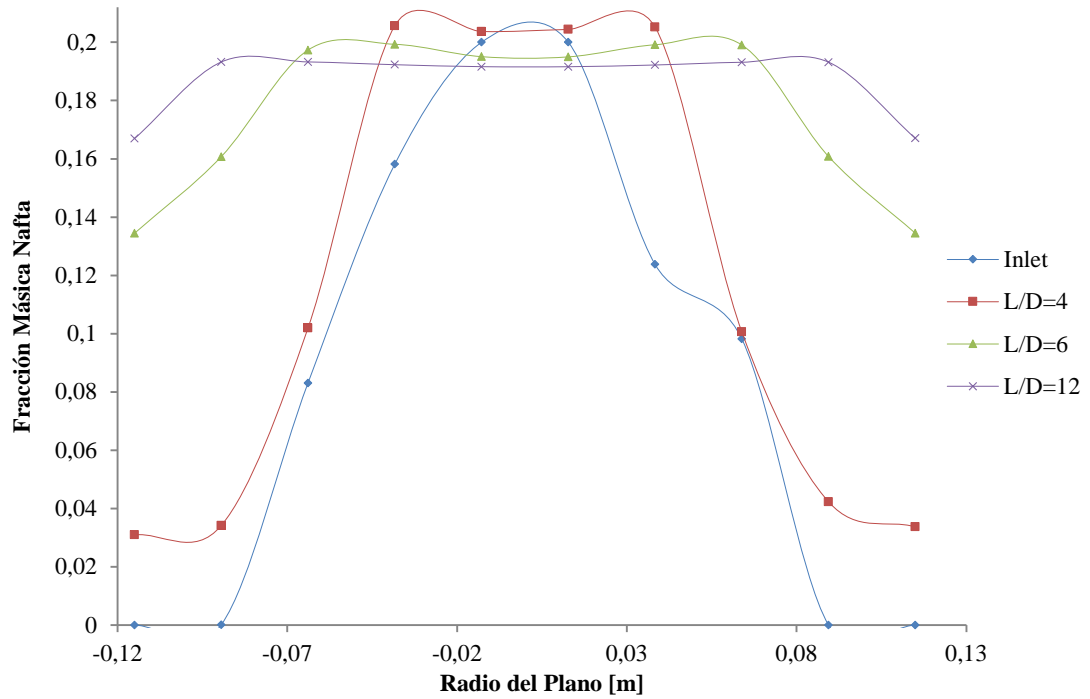
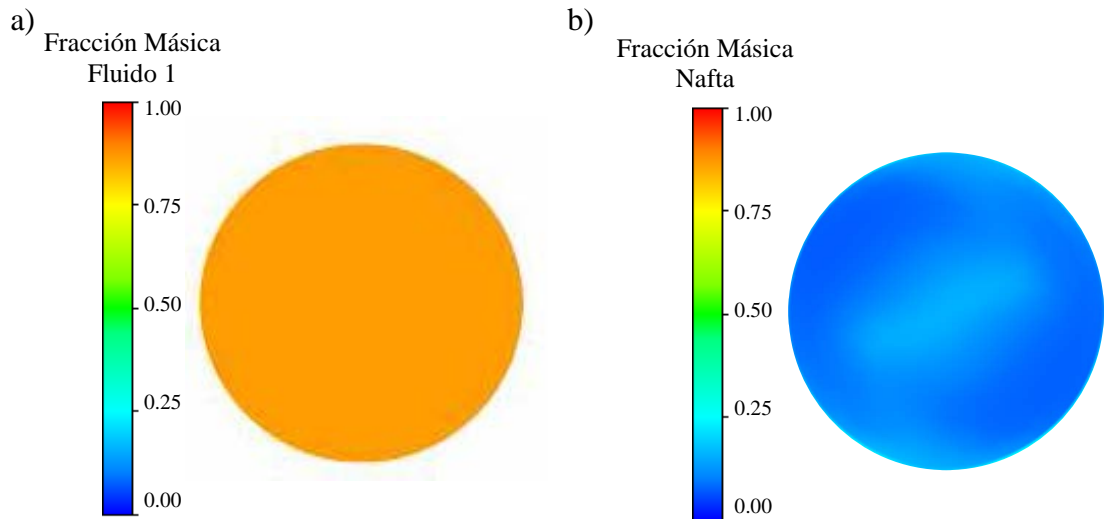


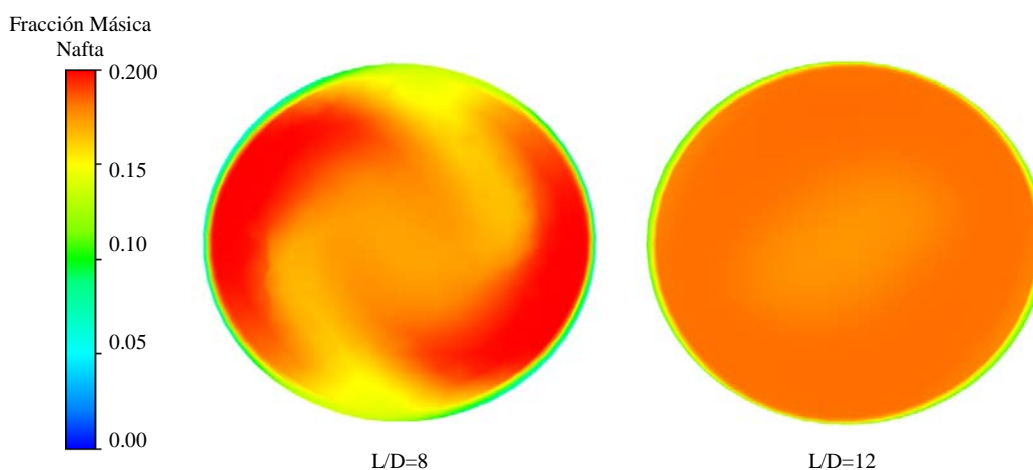
Figura 17. a) Mezclador estático de doble escama. Adaptado de Joaquim *et.al* (2011). b) Mezclador estático LPD simulado.



Estos dos perfiles permiten establecer que el mezclador estático simulado en este trabajo (Figura 15.b) cumple la función de mezclar los fluidos en estudio, pues muestra puntos de igual concentración en gran parte del plano o variaciones muy pequeñas en algunas regiones del mismo; presentando características similares a las observadas en simulaciones encontradas en la literatura (Figura 15.a).

Dentro de los datos utilizados en la simulación, obtenidos de Ecopetrol² el rango establecido para la nafta corresponde de 14% a 25%. Los resultados mostrados anteriormente fueron realizados con un 14% de nafta para diluir 20.000 bbl/d de crudo pesado. Según los resultados obtenidos a partir del plano de salida, es posible inferir que la mezcla entre las cantidades especificadas de crudo pesado y nafta es adecuada, permitiendo que el crudo obtenga las características necesarias para su transporte. De igual forma, es posible afirmar que el mezclador estático utilizado resulta ser apropiado para el tratamiento de fluidos de alta viscosidad, como es el caso de un crudo pesado de 7° API; pues con una relación baja de L/D (L/D=12) muestra resultados lógicos en términos industriales. Para mezcladores estáticos comerciales, las relaciones L/D que muestran los mejores perfiles de concentración a la salida están entre 12 y 24, exhibiendo valores bajos de variación en las concentraciones, menores a 5%, el cual es el valor permitido en procesos industriales (Joaquim 2008). Obtener perfiles con condiciones de mezclado aceptables para L/D menores a los utilizados comúnmente resulta ser de gran importancia, pues permiten disminuir gastos en la construcción del prototipo y la caída de presión generada por los elementos fijos en el interior será menor.

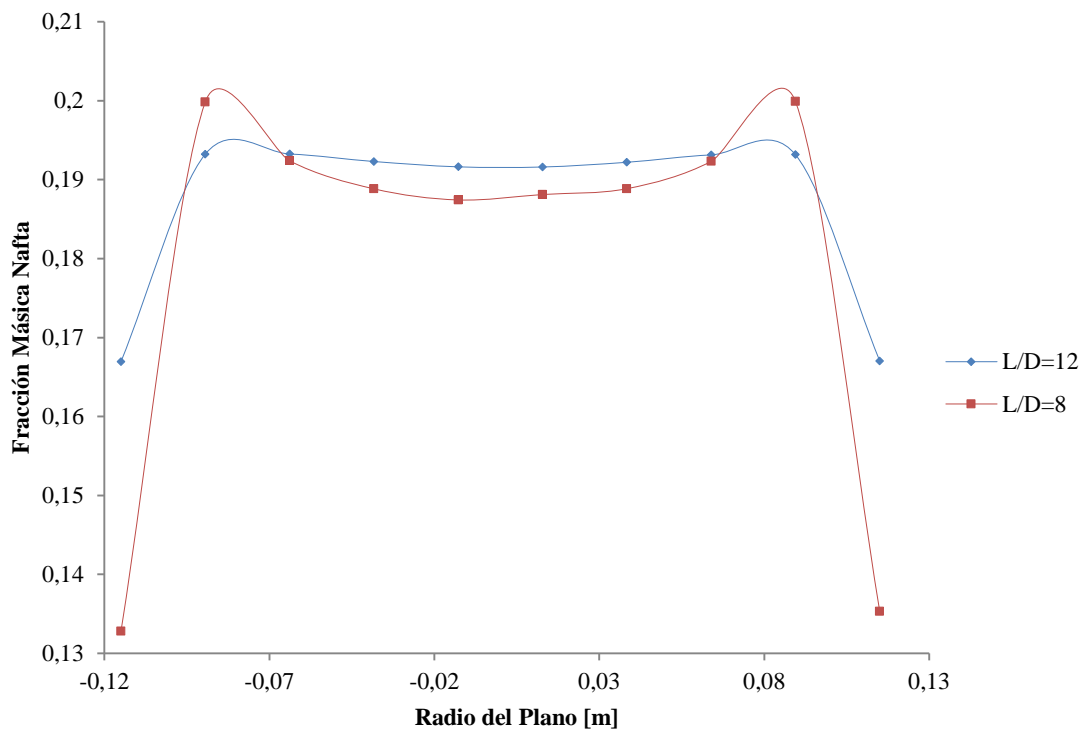
Figura 18. Perfiles Transversales de Fracción Másica para Nafta a L/D=8 y L/D=12.



² Recuperado el 14 de agosto de 2015 http://www.ecopetrol.com.co/documentos/64629_ANEXO_No.1_ALCANCE_DEL_SERVICIO.pdf

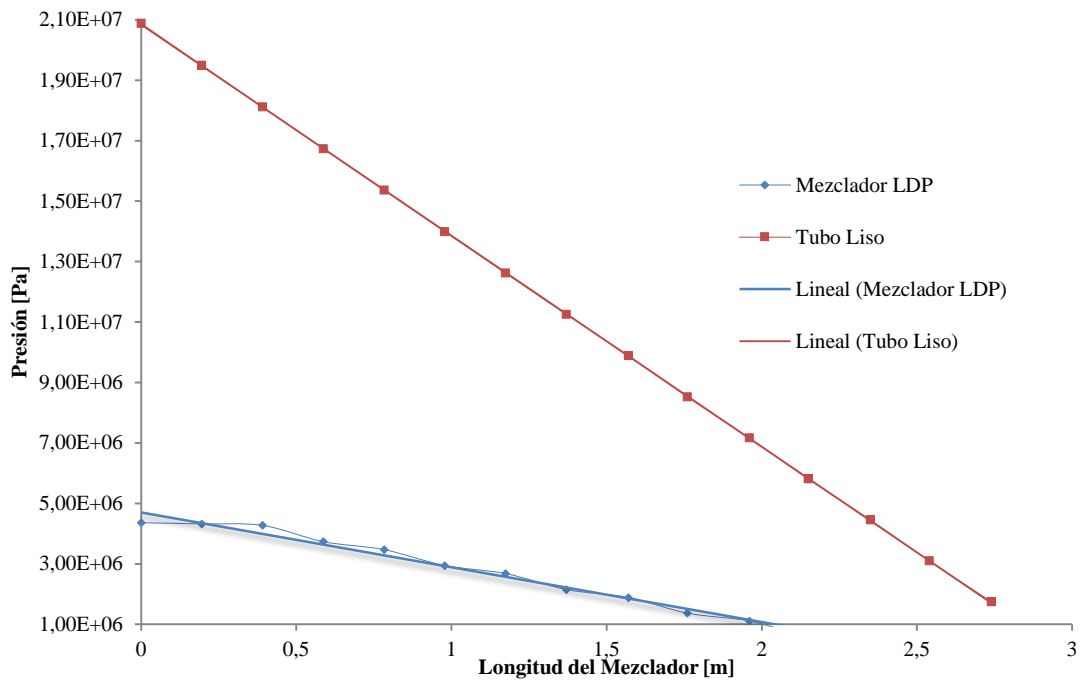
Con el análisis realizado a partir de los resultados obtenidos, se determinó que este tipo de mezclador puede proporcionar buena calidad de la mezcla con L/D menores a 12. La Figura 18 permite observar el perfil de concentraciones para un plano ubicado en $L/D=12$ y otro en $L/D=8$. En una descripción cualitativa, de acuerdo con los perfiles transversales, las variaciones de concentración, para $L/D=8$ continúan siendo bajas, pues el plano se mantiene en un conjunto de colores uniforme. Una menor relación de L/D permitirá una menor longitud del mezclador estático, razón por la cual el costo del dispositivo disminuirá. Por otra parte, en una descripción cuantitativa, en la Gráfica 4 es posible observar que las curvas para las dos relaciones L/D no presentan diferencias considerables en la mezcla de fluidos en el centro de la tubería. En regiones cerca de la pared del tubo, se encuentran altas variaciones de concentración debido a la alta viscosidad y densidad de uno de los fluidos. Esta continúa siendo una preocupación en la dilución de crudos pesados, pues en la región cercana a la pared la calidad de la mezcla es baja.

Gráfica 4. Distribución de Concentración de Nafta para $L/D=8$ y $L/D=12$

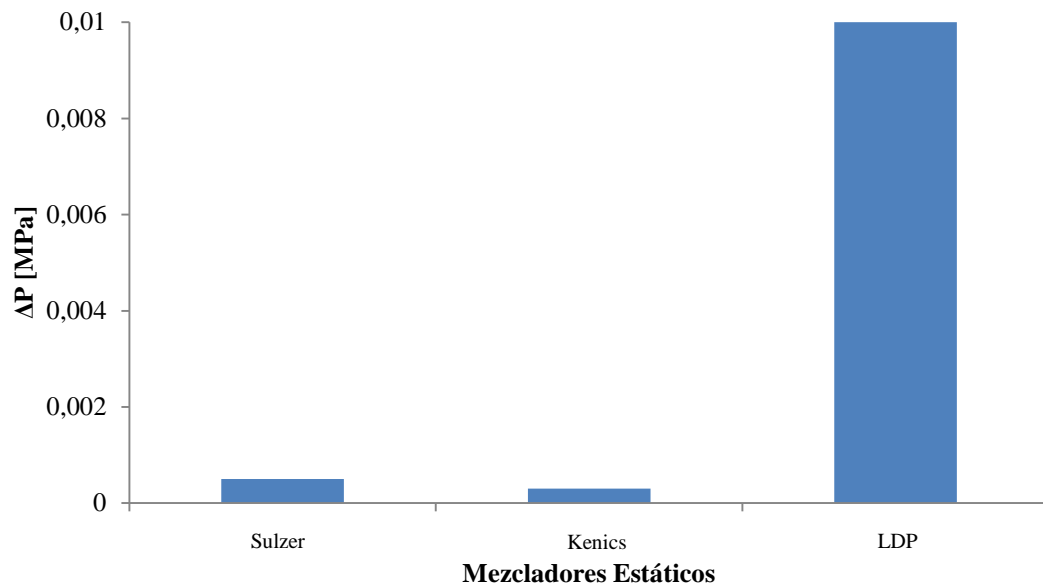


4.3 CAÍDA DE PRESIÓN POR UNIDAD DE LONGITUD

Gráfica 5. Caída de Presión por Unidad de Longitud.



Gráfica 6. Comparación de caída de presión entre mezcladores estáticos comerciales y mezclador estático LDP simulado.



Uno de los principales problemas en el flujo de fluidos a través de una tubería es la caída de presión cuando el fluido que circula entra en contacto con una superficie sólida. Para el caso de los mezcladores estáticos, la superficie sólida no solo hace referencia a la pared de la tubería, también incluye a cada uno de los elementos sólidos inmóviles que se encuentran en el interior del tubo. La caída de presión, en la mayoría de los casos se debe a pérdidas por fricción y contribuye considerablemente en el aumento de gastos por bombeo de los fluidos.

La Gráfica 5 muestra la caída de presión para la tubería lisa y la tubería con mezclador estático. El análisis fue realizado en el centro del tubo. A partir de los datos de presión obtenidos en la gráfica para el mezclador estático, se determinó ΔP y fue comparado con la caída de presión de mezcladores estáticos comerciales. La

Gráfica 6 resume el ΔP para los mezcladores Sulzer, Kenics y LPD simulado. En ella observa que la caída de presión del LPD es alta, comparada con la mostrada para el Sulzer y Kenic en flujo turbulento para la relación $L/D=12$ (Joaquim 2008), razón por la cual es posible afirmar que este mezclador ocasionará gasto considerable de energía con la longitud especificada de simulación. Por esta razón se considera necesario que la longitud del mezclador sea menor, pues se tendrán menos elementos estáticos que generen la alta caída de presión.

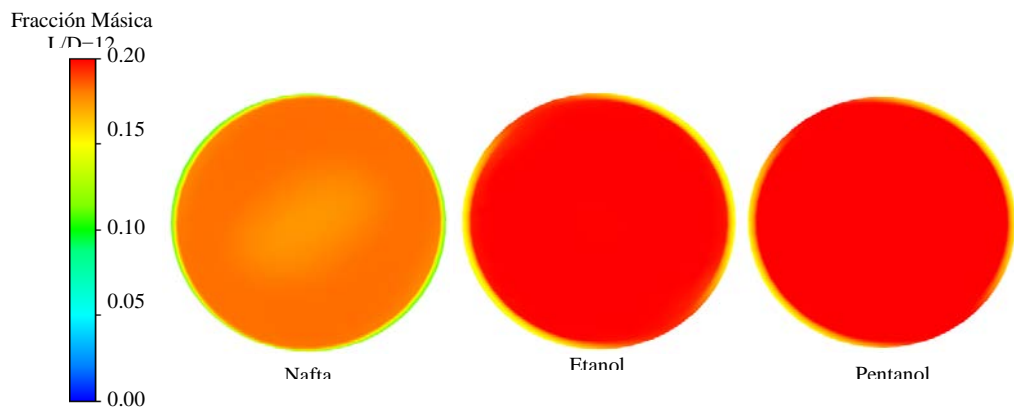
4.4 CASO DE ESTUDIO (ETANOL Y PENTANOL)

Solventes alcoholes como el pentanol (HENAUT *et.al.* 2007) y etanol (SHADI W. HASAN *et.al.* 2010) están siendo estudiados. Los análisis de estos, demuestran altas eficiencias para la dilución de crudos pesados. Por ejemplo, el pentanol presenta el doble de la eficiencia alcanzada por un solvente como el queroseno. En el presente trabajo se analizó el comportamiento y calidad de la mezcla del crudo pesado con el pentanol y etanol.

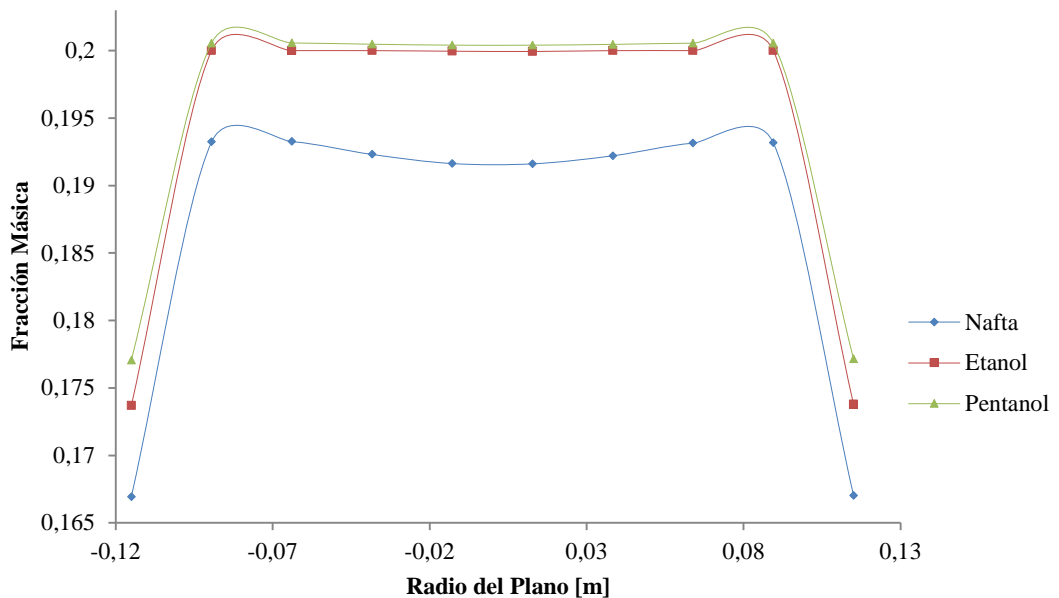
La Figura 19 muestra que los perfiles de concentración de los componentes al final del mezclador estático, presentan una calidad excelente de la mezcla, y mejoran la apariencia de la misma en la pared de la tubería. Teniendo en cuenta los resultados anteriores, es posible decir que el mezclador LPD (*Low Pressure Drop*), continua

siendo eficiente para mezclado de crudos pesados con cualquier solvente que permita reducir la viscosidad y densidad del mismo. La Gráfica 7 analiza de forma cuantitativa los perfiles de fracción másica, mostrando que la variación de concentración para el etanol y pentanol es menor que para la nafta, entonces la calidad de mezclado será mayor, presentando semejanza con los perfiles obtenidos para mezcladores estáticos comerciales.

Figura 19. Perfiles Transversales de Fracción Másica para L/D=12



Gráfica 7. Distribución de Concentración para L/D=12



5. CONCLUSIONES

El modelo matemático desarrollado para el desempeño del mezclador estático LPD (*Low Pressure Drop*) podrá ser utilizado para aplicaciones industriales haciendo uso de información detallada para el proceso como configuraciones geométricas de los elementos fijos y propiedades de los fluidos utilizados. El modelo propuesto y el simulador permitieron estudiar el fenómeno de mezclado dentro del dispositivo, teniendo en cuenta parámetros como: calidad de la homogenización, velocidad y caída de presión.

Con los resultados obtenidos a partir de las simulaciones y el posterior análisis de los mismos, se infiere que los mezcladores estáticos son dispositivos que resultan ser relevantes para tratamiento de crudo, especialmente, en el área de transporte de petróleo pesado, en lo referente al proceso de dilución. La importancia de esta tecnología en esta área, radica en la calidad de la homogenización que experimentan los fluidos al pasar a través de los elementos fijos en el interior de la tubería, permitiendo mayor eficiencia en el procedimiento.

El análisis fue realizado teniendo en cuenta los resultados de las simulaciones hechas con la técnica CFD, permitió comprobar que la calidad de la mezcla depende, exclusivamente, del número de elementos fijos que se encuentran dentro de la tubería, es decir, a medida que estos aumentaron, la mezcla mostró un mejor comportamiento. De esta forma, se observó, que la relación $L/D=12$, a pesar de no ser la más alta utilizada industrialmente ($L/D=24$), es la que presenta resultados aceptables para los fluidos utilizados en la simulación.

Con la comparación realizada a partir de los perfiles de salida para $L/D=8$ y $L/D=12$, se determinó que el mezclador estático LPD presenta buena calidad de homogenización a partir de relaciones L/D menores a 12. Este resultado permite inferir la alta eficiencia proporcionada por el dispositivo y la disminución en costos de fabricación, pues la longitud necesaria será menor.

Fue posible mostrar, de acuerdo al análisis de los perfiles de velocidad para los casos de estudio, que la velocidad en el centro de la tubería aumenta cada vez que el fluido tiene contacto con los deflectores a su paso. Así mismo, también se observó el comportamiento de la velocidad en la pared de la tubería, la cual experimentó valores bajos, cercanos a cero, debido a la fricción entre el fluido y la tubería.

Teniendo en cuenta que la caída de presión por unidad de longitud que experimenta un fluido está relacionada con el contacto entre el fluido y una superficie sólida, y de acuerdo al perfil mostrado en el análisis de resultados, se llega a la conclusión que hay una caída de presión alta. Dicho comportamiento se da debido a que las superficies solidas con las cuales se encuentra el fluido durante su recorrido por la tubería son considerables, lo que llevaría a un aumento del costo de bombeo de los fluidos.

De acuerdo a estudios realizados con solventes para dilución de crudos, se determinó que los alcoholes como el pentanol y el etanol muestran un aumento en la eficiencia de la dilución de crudos pesados. Por tal motivo, se analizó el comportamiento de estos alcoholes en la mezcla con el crudo pesado y los resultados obtenidos permiten inferir que presentan perfiles de concentración aceptables, con un leve aumento en la eficiencia, comparados con los perfiles presentados por la nafta. De la misma forma, es posible concluir que el uso del pentanol y etanol representan un menor costo, lo que favorecerá el proceso.

6. TRABAJOS FUTUROS

I. Optimización de la geometría.

La optimización de las geometrías del mezclador estático podría ser realizada a partir de CFD, teniendo en cuenta que comercialmente, los mezcladores estáticos encontrados para mezcla de fluidos altamente viscosos o con diferencias considerables en la viscosidad y densidad, son aquellos en que los elementos fijos están muy cercanos tanto a la pared de la tubería como entre ellos, generando de esta forma un movimiento caótico fuerte que permita la homogenización de los fluidos (THAKUR R.K. *et.al.*, 2003).

II. Reducción de viscosidad y densidad utilizando calentamiento.

El uso de calor para reducción de las propiedades de un fluido como la viscosidad y densidad, permitiría obtener resultados de dilución de hidrocarburos en menor tiempo y con una baja relación L/D del mezclador estático, razón por la cual reduciría costos de fabricación y mantenimiento del equipo.

III. Utilizar otros diluentes.

Desde un punto de vista económico, encontrar un diluyente que permite obtener mayor eficiencia será benéfico para el proceso, pues reducirá la cantidad de solvente necesario para obtener una menor viscosidad y densidad, permitiendo el transporte de grandes cantidades de crudo a un menor costo.

BIBLIOGRAFIA

ALVAREZ-CASTRO H.C, *et.al.* The influence of the fluidization velocities on products yield and catalyst residence time in industrial risers. En: Advanced Powder Technology. 2015. Vol. 45. N° páginas 11-17.

ALVAREZ-CASTRO H.C. Análise das variáveis de processo via CFD visando aperfeiçoamento de performance em riser FCC. Tese de Doutorado. Brasil: Universidade Estadual de Campinas – SP., 2011

ALVAREZ-CASTRO H.C. Estudo do tempo de mistura em tanques de diesel com o uso da fluidodinâmica computacional. Dissertação de Mestrado. Brasil: Universidade Estadual de Campinas – SP. 2014

AHMAD H, H. Energy companies use ANSYS software to design equipment and develop new technologies across the entire oil and gas supply chain. In I. ANSYS (Ed.), Energy and Process Industries [online] 2012. Vol N° [cited] pp. 1-35. Available from: . ANSYS, Inc.: www.ansys.com.

AMIRANTE R., MOSCATELLI P.G., CATALANO L.A. Evaluation of the flow on a direct (single stage) proportional valve by means of a computational fluid dynamic analysis. Energy Conversion & Management. [online] 2014. Vol N° 48. [cited] pp. 942-953. Available from: www.sciencedirect.com.

BALABEL, A. EL-ASKARY W.A. On the performance of linear and nonlinear $k-\epsilon$ turbulence models in various jet flow applications. European Journal of Mechanics B/Fluids [online] 2010. Vol N° 30. [cited] pp. 325-340. Available from: www.sciencedirect.com.

BARAILLER, Fabien; HENICHE, Mourad; TANGUY, Philippe A. CFD analysis of a rotor-stator mixer with viscous fluids. *Chemical engineering science* [online] 2006. Vol N° 61. [cited] pp. 2888-2894. Available from: www.sciencedirect.com.

BLOCKEN, Bert. DEFRAEYE, Thijs. KONINCKX, Erwin. CARMELIET, Jan. HESPEL, Peter. CFD simulations of the aerodynamic drag of two drafting cyclists. *Computer & Fluids*. [online] 2012. Vol N° 71. [cited] pp. 435-445. Available from: www.sciencedirect.com.

CHEN, J. YANG, H.X. LIU, C.P. LAU, C.H. LO. M. A novel vertical axis water turbine for power generation from water pipelines. *Energy*. [online] 2013. Vol N° 54. [cited] pp. 184-193. Available from: www.sciencedirect.com.

DADASHZADEH, Mohammad. ABBASSI, Rouzbeh. KHAN, Faisal. HOWBOLDT, Kelly. Explosion modeling and analysis of BP Deepwater Horizon accident. *Safety Science*. [online] 2013. Vol N° 57. [cited] pp. 150-160. Available from: www.sciencedirect.com.

GATEAU, P. *et.al.* Heavy oil dilution. *Oil & gas science and technology*. [online] 2004. Vol N° 91. [cited] pp. 110-116. Available from: www.sciencedirect.com.

GHANEM, Akram, *et.al.* Static mixers: Mechanisms, applications, and characterization methods – A review. *Chemical Engineering Research and Design*. [online] 2013. Vol N° 92. [cited] pp. 205-228. Available from: www.sciencedirect.com.

GONZALEZ, Germán. Metodología para aplicar LES ao craqueamento catalítico fluido em um reator riser industrial. Tese de Doutorado. Brasil: Universidade Estadual de Campinas. 2012. 70 p.

GOUNDAR, N. Jai. AHMED, M. Rafiuddin. Design of a horizontal axis tidal current turbine. *Applied Energy*. [online] 2013. Vol N° 111. [cited] pp. 796-802. Available from: www.sciencedirect.com.

HALIMI, Burhanuddin. KIM, H. Seung. SUH, Y. Kune. Engineering of combined valve flow for power conversion system. *Energy Conversion and Management*. [online] 2012. Vol N° 65. [cited] pp. 448-455. Available from: www.sciencedirect.com.

HENAUT I, *et. al.* Pipeline transportation of heavy oils, a strategic, economic and technological challenge. *Oil and Gas Science and Technology*. [online] 2004. Vol N° 59. [cited] pp. 345-360. Available from: www.sciencedirect.com.

JOAQUIM *et.al.* Development of static mixers for miscible fluids in laminar flow with the use of computational fluid dynamics (CFD). *The Canadian Journal of Chemical Engineering*. [online] 2011. Vol N° 89. [cited] pp. 734-744. Available from: onlinelibrary.wiley.com.

JOVANOVIĆ, Aca, *et.al.* DEM/CFD analysis of granular flow in static mixers. *Powder Technology*. [online] 2014. Vol N° 266. [cited] pp. 240-248. Available from: www.sciencedirect.com.

MASAAKI *et.al.* Translation of computational fluid dynamics to Neurosurgery. *World Neurosurgery*. [online] 2014. Vol N° 83. [cited] pp. 15-16. Available from: www.sciencedirect.com.

MALISKA, C. R. *Tranferência de calor e mecânica dos fluidos computacional*. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos Editora, 1995.

MUSHTAK Al – Atabi, *et.al.* Computational analisys of the flow of bile in human cystic duct. *Medical Engineering y Physisc*. [online] 2011. Vol N° 130. [cited] pp. 1-16. Available from: www.sciencedirect.com.

MÖHRING, H.-C.; KAYAPINAR, H.; DENKENA, B. Multi-scale positioning control model of a novel fluid dynamic drive by coupling process and adapted CFD models. *Procedia CIRP*. [online] 2012. Vol N° 2. [cited] pp. 92-97. Available from: www.sciencedirect.com.

NAKAHASHI, Kazuhiro. Aeronautical CFD in the age of Petaflops-scale computing: From unstructured to Cartesian meshes. *European Journal of Mechanics B/Fluids*. [online] 2013. Vol N° 40. [cited] pp. 75-86. Available from: www.sciencedirect.com.

LARS Y TERJE. Erosion of oil & gas industry choke valves using computational fluid dynamics and experiment. *International Journal of Heat and Fluid Flow*. [online] 1998. Vol N° 19. [cited] pp. 636-643. Available from: www.sciencedirect.com.

PALANISAMY *et.al*. Continuous flow synthesis of ceria nanoparticles using static T-mixers. *Chemical Engineering Science*. [online] 2012. Vol N° 78. [cited] pp. 46-52. Available from: www.sciencedirect.com.

PERVAIZ, Salman, *et.al*. A Coupled FE and CFD Approach to Predict the Cutting Tool Temperature Profile in Machining. *Procedia CIRP*. [online] 2014. Vol N° 17. [cited] 750-754. Available from: www.sciencedirect.com.

PEYRET, Roger. HANBOOK OF COMPUTATIONAL FLUID DYNAMICS. Université de Nice. 2004.

SAATDIJIAN *et.al*. On chaotic advection in static mixer. *Chemical Engineering Journal*. [online] 2011. Vol N° 187. [cited] pp. 289-298. Available from: www.sciencedirect.com.

SANDERSE, B. VERSTAPPEN, R.W.C.P. KOREN, B. Boundary treatment for fourth – order staggered mesh discretizations of the incompressible Navier – Stokes equations. *Journal of*

Computational Physics. [online] 2013. Vol. N° 257. [cited] pp. 1472-1505. Available from: www.sciencedirect.com.

SANIERE, A.; HÉNAUT, I.; ARGILLIER, J. F. Pipeline transportation of heavy oils, a strategic, economic and technological challenge. Oil & gas science and technology. [online] 2004. Vol N° 59. [cited] pp. 265-272. Available from: www.sciencedirect.com.

SHADI W. Hasan, *et. al.* Heavy crude oil viscosity reduction and rheology for pipeline transportation. Fuel. [online] 2010. Vol N° 89. [cited] pp. 1095-1100. Available from: www.sciencedirect.com.

SHIDEH FATHI ROUDSARI, *et.al.* CFD modeling of the mixing of wáter in oil emulsions. Computers and Chemical Engineering. [online] 2012. Vol N° 45. [cited] pp. 124-136. Available from: www.sciencedirect.com.

SINGAL, Vaibhav, *et.al.* CFD Analysis of a Kerosene Fuel Tank to Reduce Liquid Sloshing. Procedia Engineering. [online] 2014. Vol N° 69. [cited] pp. 1365-1371. Available from: www.sciencedirect.com.

SUN, Zhonghua; XU, Lei. Computational fluid dynamics in coronary artery disease. Computerized Medical Imaging and Graphics. [online] 2014. Vol N° 8. [cited] pp. 1156-116. Available from: www.sciencedirect.com.

SHUANBAO, Yao, *et.al.* Optimization design for aerodynamic elements of high speed trains. Computers & Fluids. [online] 2014. Vol N° 95. [cited] pp. 56-73. Available from: www.sciencedirect.com.

THAKUR *et.al.* Static mixers in the process industries – A review. Institution of Chemical Engineers. [online] 2003. Vol N° 81. [cited] pp. 205-228. Available from: www.sciencedirect.com.

ZANINO R., BONIFETTO R., CHRISTIAN J.M., HO C.K., RICHARD Savoldi L. CFD analysis of ITER first wall 06 panel. Model set – up and flow distribution. Fusion Engineering and Design. [online] 2013. Vol N° 89. [cited] pp. 442-455. Available from: www.sciencedirect.com.

ZHANG Tian – Hu, LIU Feng – Guo, YOU Xue – Yi. Optimization of gas mixing system of premixed burner based on CFD analysis. Energy Conversion and Management. [online] 2013. Vol N° 85. [cited] pp. 131-139. Available from: www.sciencedirect.com.