

SIMULACIÓN NUMÉRICA DE UN SEPARADOR GAS-LÍQUIDO TIPO CICLÓN
CILÍNDRICO UTILIZANDO DINÁMICA DE FLUIDOS COMPUTACIONAL

JUAN SEBASTIAN CORNEJO CACERES

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-QUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA DE PETRÓLEOS
BUCARAMANGA
2018

SIMULACIÓN NUMÉRICA DE UN SEPARADOR GAS-LÍQUIDO TIPO
CICLÓN CILÍNDRICO UTILIZANDO DINÁMICA DE FLUIDOS
COMPUTACIONAL

JUAN SEBASTIAN CORNEJO CACERES

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

Director

ARLEX CHAVES GUERRERO
Ph.D. en Ingeniería Química

Codirectores

GERMÁN GONZÁLEZ SILVA
Ph.D. en Ingeniería Química

NATALIA PRIETO JIMÉNEZ
M.Sc. en Ingeniería Química, Ph.D.(c)

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-QUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA DE PETRÓLEOS
BUCARAMANGA
2018

DEDICATORIA

Dedico este trabajo a principalmente a Dios, a los mejores padres del mundo, Patricia y Harold y a mi hermano Nicolás. Hacen que todo sacrificio valga la pena.

A mis amigos de la universidad, a la selección de voleibol y a ACIPET UIS por haberme dado los mejores momentos y enseñanzas inolvidables.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a la Universidad Industrial de Santander y a la escuela de Ingeniería de Petróleos, por la excelente formación académica y las grandes oportunidades que recibí.

Al profesor Arlex Chaves Guerrero por la confianza y las recomendaciones durante la realización del proyecto.

Al profesor Germán González Silva quien vio potencial en mí desde los comienzos de mi vida universitaria.

A Natalia Prieto Jiménez por su valiosísima ayuda, el tiempo dedicado, la confianza y las palabras de ánimo.

A Amirhosein Ghasemi por estar dispuesto a aclarar cualquier duda del trabajo.

TABLA DE CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	16
1. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA	18
1.1 SEPARACIÓN GAS-LÍQUIDO CONVENCIONAL EN LA INDUSTRIA PETROLERA	18
1.1.1 Separadores gravitacionales	19
1.1.2 Separadores de filtro	20
1.1.3 <i>Scrubbers</i>	21
1.2 SEPARADORES GLCC	22
1.2.1 Geometría del separador GLCC:	25
1.2.2 Aplicaciones:	29
2. MODELO MATEMÁTICO	31
2.1 ECUACIONES DE TRANSPORTE	31
2.2 MODELO DE TURBULENCIA	32
2.3 MODELO DE FLUJO MULTIFÁSICO	35
2.4 MODELO NUMÉRICO	36
3. METODOLOGÍA	38
3.1 IDENTIFICACIÓN DEL PROBLEMA	39
3.2 PRE-PROCESAMIENTO	39
3.2.1 Geometría	39
3.2.2 Malla	41
3.2.3 Modelos físicos	41
3.2.4 Sustancias	42
3.2.5 Condiciones de frontera	43
3.3 <i>SOLUCIÓN</i>	44
3.4 POST-PROCESAMIENTO	45
4 ANÁLISIS DE RESULTADOS	46
4.2 TEST DE INDEPENDENCIA DE MALLA	46
4.3 VALIDACIÓN DEL MODELO	48
4.2 ANÁLISIS PARA LA MEZCLA AIRE-AGUA	51
4.2.1 Velocidad	52
4.2.2 Presión	54

4.2.2 Fracción volumétrica.....	56
4.3 ANÁLISIS PARA LA MEZCLA DE GAS NATURAL	60
5 CONCLUSIONES.....	66
6 TRABAJOS FUTUROS.....	69
BIBLIOGRAFÍA.....	70
ANEXOS.....	73

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Separador gravitacional horizontal.....	20
Figura 2: Separador de filtro	21
Figura 3: Separador GLCC	23
Figura 4: Regiones del separador GLCC.....	24
Figura 5: Velocidad axial.....	25
Figura 6: Efectos del diámetro en el LCO y GCU	26
Figura 7: Efecto del ángulo de la boquilla en LCO y GCU	28
Figura 8: Boquilla convergente y divergente	28
Figura 9: Separador GLCC como equipo de medición	30
Figura 10: Modelos de turbulencia.....	33
Figura 11: Capa interna	34
Figura 12: Discretización del separador GLCC.....	37
Figura 13: Metodología	38
Figura 14: Dimensiones del separador	40
Figura 15: Geometrías propuestas	40
Figura 16: Malla	42
Figura 17: Condiciones de frontera.....	44
Figura 18: Solvers.....	45
Figura 19: Puntos seleccionados para el test de malla.....	47
Figura 20: Test de malla	48
Figura 21: Velocidad axial y tangencial experimentales	49
Figura 22: Validación velocidad tangencial.....	50
Figura 23: Validación velocidad axial.....	50
Figura 24: Efecto del refinamiento	51
Figura 25: Velocidad angular mezcla aire-agua.....	52
Figura 26: Contornos de velocidad aire-agua	53
Figura 27: Velocidad líneas de flujo aire-agua.....	54
Figura 28: Presión a lo largo del separador mezcla aire-agua.....	55

Figura 29: Fracción volumétrica de agua en el separador en función del radio	57
Figura 30: Fracción volumétrica de agua en el separador	58
Figura 31: Flujo másico de agua en el separador	59
Figura 32: Velocidad angular gas natural	60
Figura 33: Contorno de velocidad y líneas de flujo del gas natural.....	61
Figura 34: Presión a lo largo del separador del gas natural.....	62
Figura 35: Contornos de fracción volumétrica para el gas natural.....	63
Figura 36: Contornos de fracción volumétrica de pentano y hexano	64

LISTA DE TABLAS

Tabla 1: Concentraciones molares del Gas Natural	19
Tabla 2: Propiedades del agua y aire.....	43
Tabla 3: Composición del gas	43

LISTA DE ANEXOS

ANEXO A- Flujo másico de agua en el ciclón para un flujo de agua 3 veces mayor.....	73
--	----

NOMENCLATURA

Símbolo	Nombre	Unidades
u	Velocidad	m/s
∇	Operador diferencial vectorial	
ρ	Densidad	kg/m^3
t	Tiempo	s
p	Presión	Pa
ν	Viscosidad cinemática	$Pa * s$
g	Gravedad	m/s^2
k	la energía cinética turbulenta	
μ_t	Viscosidad turbulenta	
ε	Disipación de la energía cinética	
$G_k, G_b, Y_M, S_k, C_{1\varepsilon}$ $G_k, G_{3\varepsilon}, G_b, C_{2\varepsilon}, C_\mu$	Constantes del modelo Estándar k- ε	
ρ_m	Densidad promedio	kg/m^3
a	Fracción volumétrica	
v_m	Velocidad promedio	m/s
v_{dr}	Cambio de la velocidad (<i>drift velocity</i>)	m/s
\vec{A}	Vector del área superficial	
Γ	Coefficiente de difusión	
μ_m	Viscosidad de la mezcla	
S	Fuente de cantidad de transporte por unidad de volumen	

RESUMEN

TÍTULO: SIMULACIÓN NUMÉRICA DE UN SEPARADOR GAS-LÍQUIDO TIPO CICLÓN CILÍNDRICO UTILIZANDO DINÁMICA DE FLUIDOS COMPUTACIONAL*

AUTOR: JUAN SEBASTIAN CORNEJO CACERES**

PALABRAS CLAVE: SEPARADORES TIPO CICLÓN CILÍNDRICO, SEPARACIÓN CENTRÍFUGA, DINÁMICA DE FLUIDOS COMPUTACIONAL (CFD), SIMULACIÓN NUMÉRICA, GAS NATURAL.

DESCRIPCIÓN: Entre las facilidades de superficie presentes en un campo, se encuentran los separadores gas-líquido. Los mecanismos de separación bifásicos más usados en la industria son los separadores gravitacionales. Estos separadores son pesados, ocupan un espacio considerable y tienen altos costos de mantenimiento. Con el objetivo de disminuir costos operacionales se han desarrollado separadores gas-liquido tipo ciclón los cuales son compactos, con geometría simple y de mantenimiento económico. En este trabajo se realiza un estudio de la separación gas-líquido en un separador tipo ciclón cilíndrico utilizando dinámica de fluidos computacional (CFD) en la herramienta ANSYS Fluent 18.0. El modelo usado para la turbulencia fue el k- ϵ y para el flujo multifásico el modelo de mezcla. Primero, se usa una mezcla de aire-agua en diferentes geometrías del separador al variar el ángulo de la boquilla de entrada de 27° a 36° y 45° a fin de seleccionar la que tenga un vórtice con mejores características para la separación de fases. Para ello, se estudian las variables de fracción volumétrica, velocidad y presión mediante gráficos y contornos hechos en la herramienta computacional. Luego, se simula una mezcla de gas natural del campo colombiano Cusiana para tener una idea del comportamiento fluido-dinámico del gas en este tipo de separadores.

*Trabajo de Grado

**Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería de Petróleos. Director: Arlex Chaves Guerrero, Ph.D. Codirectores: GERMÁN GONZÁLEZ SILVA, Ph.D. NATALIA PRIETO JIMÉNEZ, Ph.D.(c)

ABSTRACT

TITLE: NUMERICAL SIMULATION OF A GAS-LIQUID CYLINDRICAL CYCLONE SEPARATOR USING COMPUTATIONAL FLUID DYNAMICS.

AUTHOR: JUAN SEBASTIAN CORNEJO CACERES**

KEYWORDS: GAS-LIQUID CYLINDRICAL CYCLONE SEPARATOR, CENTRIFUGAL SEPARATION , COMPUTATIONAL FLUID DYNAMICS (CFD), NUMERICAL SIMULATION, NATURAL GAS.

DESCRIPTION: Among the surface facilities used in an oil field, there are gas-liquid separators. The most used equipment are the gravitational separators which are heavy, big and have high maintenance costs. In order to reduce the operational costs, it has been developed the gas liquid cylindrical cyclone separator (GLCC) which is compact, have a simple geometry and economical maintenance. Added to that, multiple studies have shown that the GLCC is more efficient than the conventional separators. In this work, it is made a study of gas-liquid separation in a cylindrical cyclone separator using Computational Fluids Dynamics (CFD) through the tool ANSYS Fluent 18.0. The model used for turbulence is the k- ϵ and for the multiphase flow is the mixture model. Firstly, an air-water mixture is used in different geometries of the separator varying the inlet angle from 27° to 36° and 45° to selecting the one which have a vortex with the best characteristics for phases separation. Therefore, variables as the volumetric fraction, velocity and pressure are studied in the separator. Then, a natural gas mixture from a colombian oil field called Cusiana, is simulated for having an idea of the fluid-dynamic behavior of the gas in this kind of separator.

** Bachelor Thesis

**Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería de Petróleos. Director: Arlex Chaves Guerrero, Ph.D. Codirectors: GERMÁN GONZÁLEZ SILVA, Ph.D. NATALIA PRIETO JIMÉNEZ, Ph.D.(c)

INTRODUCCIÓN

A fin de obtener el mayor beneficio económico del gas natural, es necesario mejorar su composición química. Uno de los procesos de mejora es la separación de las fracciones pesadas o condensados con el propósito de cumplir con las reglamentaciones para su transporte y distribución¹. Además, al separar las fracciones pesadas del gas, los condensados se pueden comercializar.

Para la separación de la mezcla de hidrocarburos de producción de un pozo se utilizan separadores gas-líquido. Los equipos de separación bifásicos más usados en la industria son los separadores gravitacionales, estos, son pesados, ocupan un espacio considerable y tienen altos costos de mantenimiento. Para disminuir costos operacionales se han desarrollado separadores gas-liquido tipo ciclón los cuales son compactos, con geometría simple y de mantenimiento económico. Estos equipos usan, además de la gravedad, la fuerza centrífuga para separar las mezclas bifásicas. Los ciclones son mecanismos estáticos de efecto inercial que utilizan la fuerza centrífuga para separar partículas pesadas de las más livianas. En ellos, una corriente entra de manera tangencial a las paredes del mecanismo, formando un vórtice el cual separa las partículas². Para generar una separación efectiva es necesario utilizar dimensiones y geometría del separador apropiadas. El entendimiento de la fluidodinámica en el ciclón se hace mediante los modelos mecánicos encontrados en la literatura³ y con la dinámica de fluidos computacional CFD (por sus siglas en inglés, *Computational Fluid Dynamics*) se puede predecir la complejidad su comportamiento y validar los modelos

¹ Comisión de Regulación de Energía y Gas (CREG), «Resolución No. 071: Reglamento Unico de Transporte de Gas Natural- (RUT)», 1999, <http://www.creg.gov.co/>.

² HOFFMANN, A. C. y STEIN, L. E., *Gas Cyclones and Swirl Tubes* (Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2007, <https://doi.org/10.1007/978-3-540-74696-6>.

³ ARPANDI, I, *A Mechanistic Model for Two-Phase Flow in Gas-Liquid Cylindrical Cyclone Separators* (University of Tulsa, 1995).

usados con estudios experimentales de manera que se obtengan resultados cercanos a la realidad⁴.

En este trabajo se realiza un estudio de la separación gas-líquido en un separador tipo ciclón cilíndrico GLCC (por sus siglas en inglés, *Gas Liquid Cylindrical Cyclone*) utilizando dinámica de fluidos computacional con el fin de proponer una alternativa económica y práctica para el proceso de separación de hidrocarburos.

⁴ SILVA, Germán González; PRIETO, Natalia; MERCADO, Iván, «Large Eddy Simulation (LES) Aplicado a un lecho fluidizado gas-sólido. Parte I: Reactor a escala de laboratorio.», *Revista UIS Ingenierías*, 2018.

1. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

En este capítulo se hace una descripción de los métodos de separación gas-líquido y los equipos utilizados actualmente en la industria petrolera haciendo énfasis en el gran potencial que tiene la separación centrífuga. Además, se presentan los trabajos desarrollados acerca del funcionamiento de los separadores GLCC y los estudios experimentales y de CFD sobre el correcto dimensionamiento y geometría óptima de estos equipos. En la revisión bibliográfica hecha, no se encontraron estudios experimentales ni de simulación numérica acerca de la dinámica de fluidos de mezclas de gas natural en el separador estudiado.

1.1 SEPARACIÓN GAS-LÍQUIDO CONVENCIONAL EN LA INDUSTRIA PETROLERA

El gas húmedo de producción es una mezcla de varios hidrocarburos constituido en mayor proporción por metano (**Tabla 1:** Concentraciones molares del Gas Natural). Adicionalmente, el gas tiene algunos componentes pesados que se condensan y tienen valor comercial. También, contaminantes químicos, agua y residuos sólidos los cuales es necesario separar a fin de cumplir con los lineamientos de calidad, transporte y distribución exigidos por la Comisión de Regulación de Energía y gas (GREC) por medio del Registro Único de Transporte-RUT⁵. Otra necesidad de hacer esta separación es que los equipos aguas abajo como compresores o bombas no pueden manejar mezclas gas-líquido.

Para la separación gas-líquido se usan diferentes mecanismos estáticos presentes entre las facilidades de superficie de un campo. Usualmente se

⁵ Comisión de Regulación de Energía y Gas (CREG), «Resolución No. 071: Reglamento Único de Transporte de Gas Natural- (RUT)».

utilizan equipos de separación mecánica en donde las gotas de líquidos condensados se separan de las corrientes de gas por gravedad.

Tabla 1: Concentraciones molares del Gas Natural

Compuesto	Concentraciones	
	Mínima (%molar)	Máxima (%molar)
Metano	74	98
Etano	0,25	12,5
Propano	0,02	5,4
i-Butano	0	1,5
n-Butano	0	1,5
i-Pentano	0	0,6
n-Pentano	0	0,4
Hexano+	0	0,4
CO	0	5,5
O₂	0	0,5

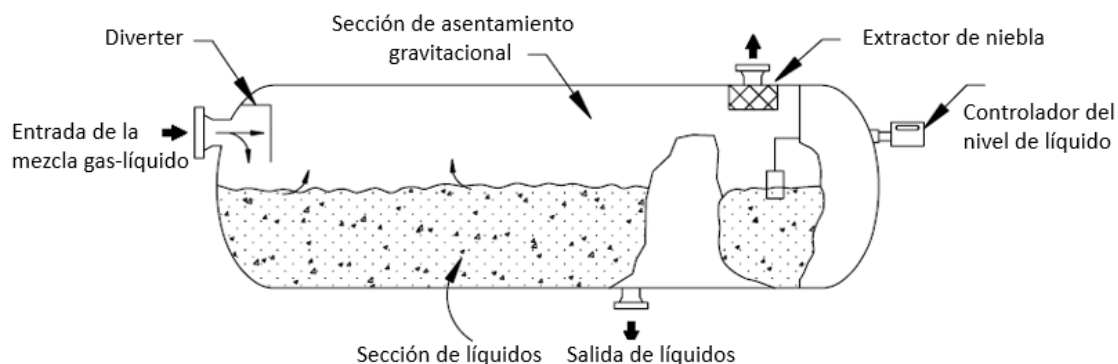
Fuente: Ecopetrol⁶

1.1.1 Separadores gravitacionales: En estos dispositivos estáticos el fluido ingresa al separador y choca con un desviador de entrada, el cual genera la primera separación entre las fases. La segunda separación se produce debido a la fuerza de gravedad que hace que las gotas de líquido caigan a la parte inferior del separador. Las gotas más pequeñas, son arrastradas por el gas hacia la corriente de salida, por lo

⁶ Ecopetrol, «Calidad del gas natural», s. f., <https://www.ecopetrol.com.co/wps/portal/es/ecopetrol-web/productos-y-servicios/productos/gas-natural/informacion-comercial/Calidad%20del%20Gas/Calidad+del+Gas>.

cual se usa un extractor de niebla en la parte superior, que atrapa parte del líquido restante. Los separadores gravitacionales pueden ser verticales, horizontales y esféricos. Siendo los últimos diseñados para operar con mayor cantidad de gas. Estos separadores son pesados y pueden ocupar un espacio apreciable, además requieren mantenimiento debido a las partes internas que poseen⁷. Los tiempos de residencia de los fluidos en estos separadores son apreciables. En la **Figura 1** se puede observar un separador horizontal con todas las partes mencionadas anteriormente.

Figura 1: Separador gravitacional horizontal



Fuente: Modificado de *Surface Production Operations*⁸

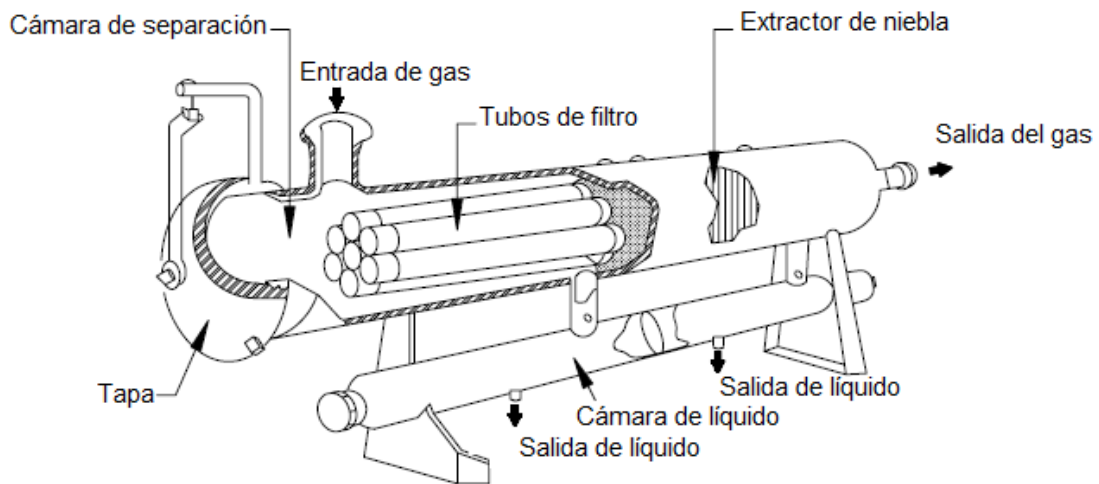
1.1.2 Separadores de filtro: Estos separadores se usan cuando la cantidad de líquido o condensados en el gas es baja y los métodos de separación gravitacional no generaron la suficiente separación de las fases. En la primera sección de estos equipos, tubos con filtros de fibra de vidrio capturan las partículas sólidas y generan la coalescencia de las gotas de líquido más pequeñas. Después, hay una segunda sección donde

⁷ SHOHAM, Ovadia y KOUBA, Gene E, «State of the Art of Gas/Liquid Cylindrical-Cyclone Compact-Separator Technology», *Journal of Petroleum Technology* 50, n.º 07 (1 de julio de 1998): 58-65, <https://doi.org/10.2118/39600-JPT>.

⁸ ARNOLD, Ken y STEWART, Maurice, *Surface Production Operations*, 3.ª ed., vol. 1, 2008. p. 156

un extractor de niebla captura las gotas formadas. Los separadores de filtro pueden remover partículas hasta de 0,3 micrómetros⁹. En la **Figura 2** se puede observar un separador de filtro y sus partes básicas.

Figura 2: Separador de filtro



Fuente: Modificado de *Surface Production Operations*¹⁰

1.1.3 Scrubbers: Son separadores gas-líquido donde la carga de líquidos es mucho menor a la de un separador gravitacional convencional. Son típicamente puestos antes de teas o compresores los cuales pueden dañarse si hay presencia de líquidos. También pueden ser ubicados después de enfriadores o equipos que causen condensación de algunas fracciones del gas.

⁹ *Ibíd.*, p. 163.

¹⁰ *Ibíd.*, p. 164.

1.2 SEPARADORES GLCC

Los ciclones son mecanismos estáticos de efecto inercial que utilizan la fuerza centrífuga para separar las partículas pesadas de las más livianas. En ellos, una corriente entra de manera tangencial a las paredes del mecanismo, formando un vórtice el cual separa las partículas. Estos dispositivos tienen una geometría simple tal y como se muestra en la **Figura 3** y tienen bajos costos de mantenimiento¹¹.

La implementación de separadores tipo GLCC en la industria del petróleo y gas conlleva a múltiples desarrollos experimentales enfocados en obtener un diseño y desempeño óptimos del separador. Además, algunos estudios se centran la comprensión del flujo multifásico en el ciclón generando un modelo mecánico que permite conocer el comportamiento fluidodinámico dentro del separador.

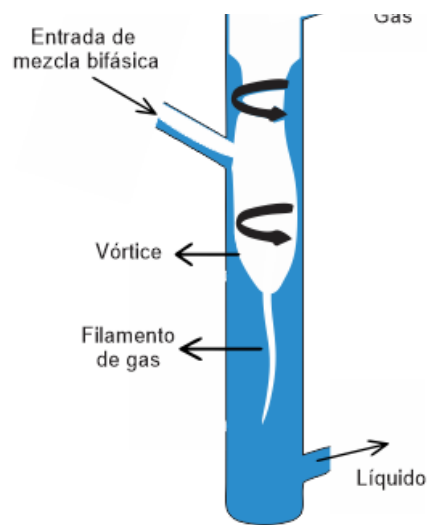
El modelo desarrollado por Gene E. Kouba, Ovadia Shoham, y Siamack Shirazi¹² permite predecir la fluidodinámica dentro del separador, luego algunos autores hicieron modificaciones al modelo las cuales permiten conocer el nivel de equilibrio del líquido, la interface gas-líquido y la cantidad de líquido que puede estar en la parte superior del separador sin que ocurra LCO (por sus siglas en inglés, *Liquid Carry Over*)¹³. Las ecuaciones del modelo describen el comportamiento fluido dinámico en el ciclón identificando las siguientes regiones o cantidades dentro del separador (**Figura 4**):

¹¹ WANG, Shoubo et al., «Gas-Liquid Cylindrical Cyclone (GLCC©) Compact Separators For Wet Gas Applications», *Journal of Energy Resources Technology* 125, n.º 1 (14 de marzo de 2003): 43-50, <https://doi.org/10.1115/1.1513180>.

¹² KOUBA, Gene E., SHOHAM, Ovadia, y SCHIRAZI, Siamack, «Design and Performance of Gas Liquid Cylindrical Cyclone Separators», 1995, <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.463.5563&rep=rep1&type=pdf>.

¹³ ARPANDI, I et al., «Hydrodynamics of Two-Phase Flow in Gas-Liquid Cylindrical Cyclone Separators», *SPE Journal* 1, n.º 04 (1 de diciembre de 1996): 427-36, <https://doi.org/10.2118/30683-PA>.

Figura 3: Separador GLCC



Fuente: Modificado de HREIZ, Rainier et al. (2014)¹⁴

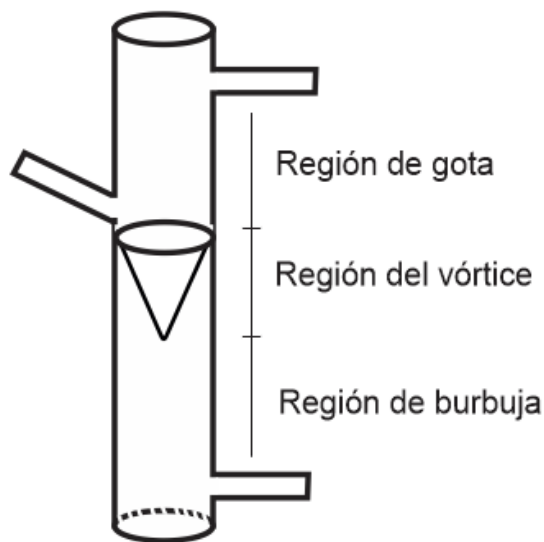
- ✓ **Región de burbuja:** Se refiere a la parte inferior del separador en donde la fase continua es el líquido. En esta sección, las burbujas más grandes entran al vórtice y las más pequeñas están distribuidas homogéneamente. Para identificar las trayectorias de las burbujas es necesario usar un modelo unificado de la trayectoria de las partículas.
- ✓ **Región de gota:** El mismo de modelo unificado de la región de burbuja es usado, pero para identificar las trayectorias de las gotas de líquido que se encuentran en la parte superior del separador.
- ✓ **Región del vórtice:** El flujo tangencial que entra de la boquilla al cilindro genera la fuerza centrífuga que produce un vórtice. Tras hacer un balance de fuerzas en un elemento del fluido La longitud del vórtice

¹⁴ HREIZ, Rainier et al., «On the effect of the nozzle design on the performances of gas–liquid cylindrical cyclone separators», *International Journal of Multiphase Flow* 58, 2014: 15-26, <https://doi.org/10.1016/j.ijmultiphaseflow.2013.08.006>.

puede ser calculada mediante una ecuación que relaciona las densidades y la velocidad tangencial del fluido.

- ✓ **Nivel de líquido de equilibrio:** Este indica la cantidad de líquido en el separador y corresponde a la caída de presión. El nivel verdadero que alcanza el líquido es mayor debido al vórtice que se forma
- ✓ **Cero flujos netos de líquido:** Condiciones a las cuales a pesar de haber flujo multifásico en la parte superior del separador no hay LCO. También se puede calcular la cantidad de líquido que puede estar en la parte superior del separador a esas condiciones.
- ✓ **LCO (zona de operación):** Indica la combinación necesaria de los flujos de líquido y gas para que haya LCO. Para esto se fija un valor de velocidad superficial de gas y la velocidad superficial del líquido se aumenta hasta que se presente el fenómeno.

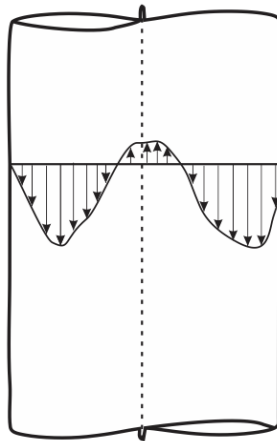
Figura 4: Regiones del separador GLCC



Después de las mejoras del modelo, otros estudios incorporan la identificación del patrón de flujo de entrada y un análisis de la corriente de entrada y de la boquilla para calcular las velocidades tangenciales de los fluidos¹⁵.

En la parte baja del sistema (región de burbuja y de vórtice), las sustancias más densas van hacia las paredes del equipo mientras las burbujas se dirigen radialmente hasta el centro del vórtice generando un filamento de gas o un recubrimiento líquido en las paredes del equipo cuando el gas es la fase continua. En el centro del mecanismo, la velocidad media del líquido es muy baja y puede estar dirigida hacia la parte superior, generando la separación de las fases (**Figura 5**).

Figura 5: *Velocidad axial*

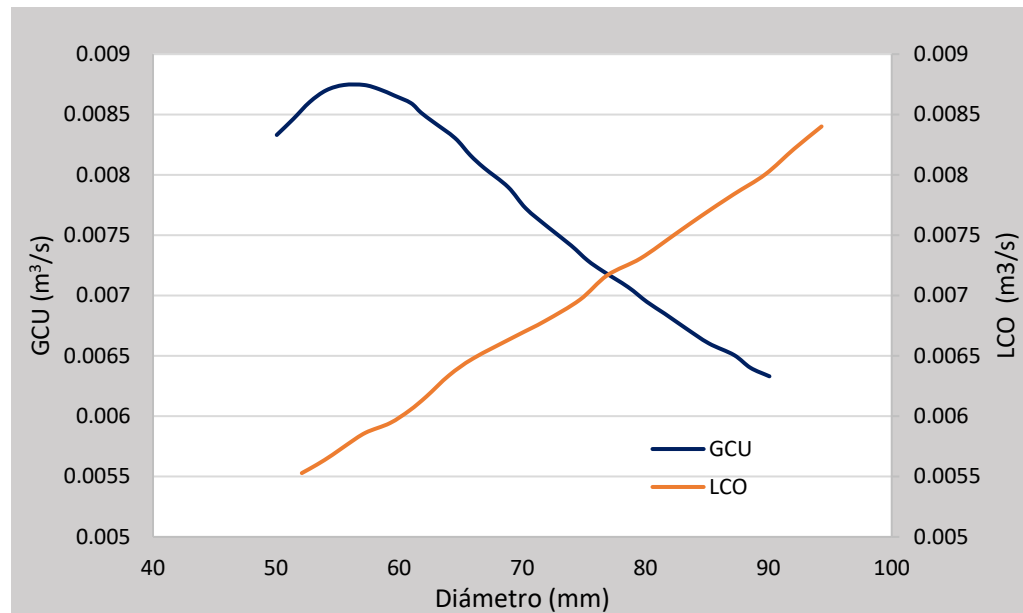


1.2.1 Geometría del separador GLCC: Entre los aspectos de diseño más importantes de un separador GLCC están: la relación entre el diámetro y longitud de su cuerpo, las dimensiones y ángulo de la boquilla por donde entra la mezcla gas-líquido. Adicionalmente, las corrientes de salida deben estar correctamente posicionadas para evitar la entrada de líquido en la corriente superior o de gas en la inferior.

¹⁵ GOMEZ, L. E et al., «Enhanced Mechanistic Model and Field-Application Design of Gas/Liquid Cylindrical Cyclone Separators», *SPE Journal* 5, n.º 02, 2000: 190-98, <https://doi.org/10.2118/62487-PA>.

- ✓ **Diámetro:** En la parte superior, el separador debe tener un diámetro lo suficientemente grande para que la velocidad superficial del gas sea menor que la velocidad crítica con el fin de evitar la formación de gotas de líquido. Si esto sucede puede haber entrada de líquido por la corriente de salida superior o LCO (por sus siglas en inglés, *Liquid Carry Over*). En la parte inferior, el diámetro debe ser lo suficientemente pequeño para que sea efectiva la separación y no haya entrada de gas por la corriente inferior o GCU (por sus siglas en inglés, *Gas Carry Under*)¹⁶. Además, el diámetro del separador puede tener efectos sobre la eficiencia de separación cambiando el LCO o GCU (**Figura 6**)¹⁷.

Figura 6: Efectos del diámetro en el LCO y GCU



Fuente: Ghasemi, et al. (2016)

¹⁶ Luis E. Gomez et al., «State-of-the-Art Simulator for Field Applications of Gas-Liquid Cylindrical Cyclone Separators» (SPE Annual Technical Conference and Exhibition, Society of Petroleum Engineers, 1999), <https://doi.org/10.2118/56581-MS>.

¹⁷ GHASEMI, Amirhosein, SHAMS, Mehrzad, y HEYHAT, Mohammad Mahdi, «A Numerical Scheme for Optimizing Gas Liquid Cylindrical Cyclone Separator», *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part E: Journal of Process Mechanical Engineering*, 24 de abril de 2016, 0954408916644002, <https://doi.org/10.1177/0954408916644002>.

- ✓ **Longitud:** La longitud del separador se establece para evitar el LCO y GCU. Para ello, la relación longitud diámetro del separador debe estar entre 8 y 10¹⁸.

- ✓ **Boquilla de entrada:** El diseño de la boquilla de entrada es de suma importancia en el separador ya que controla la intensidad del vórtice que va a generar la separación de los fluidos. Esta debe estar ubicada justo por encima del nivel de líquido en el separador para evitar que el gas que entra se mezcle con el líquido que ya está adentro¹⁹. En la mayoría de los estudios a la fecha, la boquilla de entrada tiene un ángulo de 27 grados, con el fin de aumentar la estratificación de los fluidos²⁰. En otros se cambió el ángulo de entrada y se cuantificó el efecto que tenía este sobre el LCO y GCU, mostrando que un ángulo menor a 20 grados puede ser favorable para evitar el arrastre de volúmenes grandes de fluidos por la corriente incorrecta tal y como se muestra en la **Figura 7**²¹.

Para asegurar la separación de los fluidos, es necesario concentrar el momento angular cerca de las paredes del separador y aumentar la simetría del vórtice, para lo cual se sugiere el uso de una geometría rectangular²². Además, las boquillas convergentes presentan una mayor eficiencia en la separación, sin embargo, cuando la cantidad de líquido que entra es poca, la boquilla recta presenta mejores resultados (**Figura 8**)²³.

¹⁸ GOMEZ, L. E et al., «Enhanced Mechanistic Model and Field-Application Design of Gas/Liquid Cylindrical Cyclone Separators».

¹⁹ HREIZ, Rainier et al., «On the effect of the nozzle design on the performances of gas-liquid cylindrical cyclone separators».

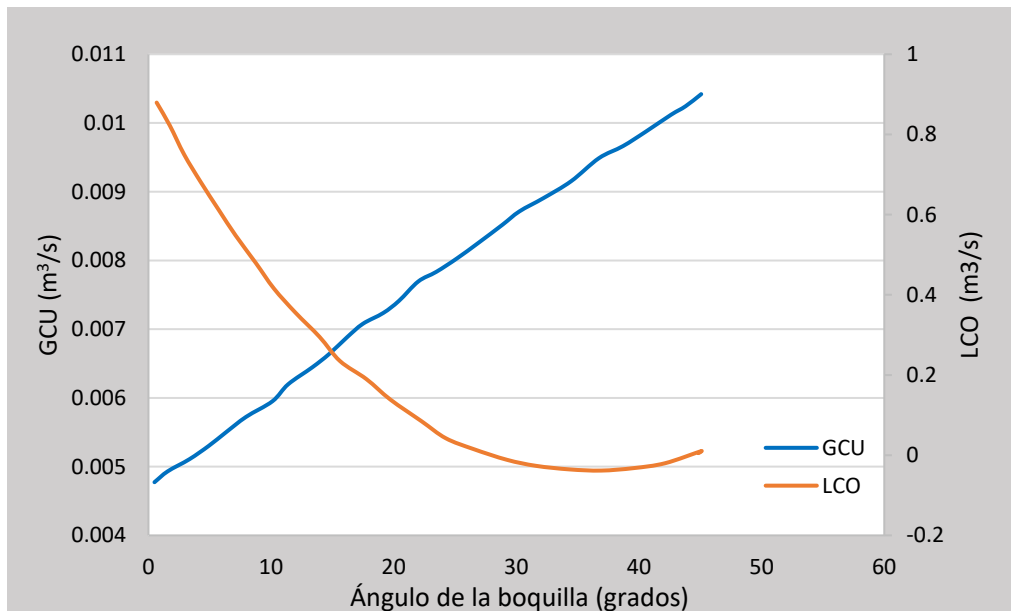
²⁰ KOUBA, Gene E., SHOHAM, Ovadia, y SCHIRAZI, Siamack, «Design and Performance of Gas Liquid Cylindrical Cyclone Separators».

²¹ GHASEMI, Amirhosein, SHAMS, Mehrzad, y HEYHAT, Mohammad Mahdi, «A Numerical Scheme for Optimizing Gas Liquid Cylindrical Cyclone Separator».

²² Khairy Elsayed y Chris Lacor, «The effect of cyclone inlet dimensions on the flow pattern and performance», *Applied Mathematical Modelling* 35, n.º 4 (abril de 2011): 1952-68, <https://doi.org/10.1016/j.apm.2010.11.007>.

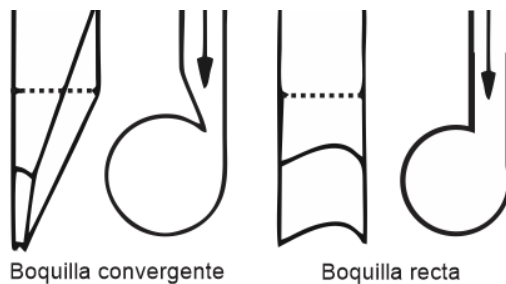
²³ HREIZ, Op.cit.

Figura 7: Efecto del ángulo de la boquilla en LCO y GCU



Fuente: Ghasemi, et al. (2016)

Figura 8: Boquilla convergente y divergente



1.2.2 Aplicaciones: Por su practicidad y buen funcionamiento, el separador GLCC no solo sirve como un separador parcial sino también como un separador primario. Además, puede ser usado como un equipo medidor de gas y líquido producidos de un pozo al separar las corrientes de cada fase y medir su flujo por separado. A continuación, se presenta un ejemplo para cada uno de los usos del GLCC los cuales fueron recopilados por el equipo *Tulsa University Separation Technology Projects (TUSTP)*, reconocidos por su experiencia en el desarrollo de estos separadores²⁴.

- ✓ GLCC como separador parcial: Este equipo es apropiado en operaciones de separación parcial del gas contenido en el líquido producido de pozos a alta presión para ser usado como un mecanismo de levantamiento artificial con gas o “*gas lift*”. Este sistema es utilizado por Chevron en Okan, Nigeria, en donde, el uso del GLCC reemplazo otros equipos como compresores y tuberías adicionales que eran utilizados para el mismo fin.
- ✓ GLCC como separador primario: Este sistema de separación total ha sido utilizado en algunos campos de Estados Unidos. Este equipo es capaz de manejar hasta 59800 bbl/d de líquido y 67180 Mscf/d.
- ✓ GLCC como equipo de medición: El GLCC ha sido utilizado como equipo de medición para 24 pozos en operados por PDVSA en Venezuela. (**Figura 9**)

²⁴ Ovadia Shoham y Ram Mohan, «Tulsa University Separation Technology Projects (TUSTP)», s. f., <http://www.tustp.org/>.

Figura 9: Separador GLCC como equipo de medición



Fuente: www.tustp.org²⁵

Además de estas aplicaciones, se ha estudiado la posibilidad de aplicar este equipo para operaciones de deshidratación del gas natural, mostrando buenos resultados²⁶.

²⁵ *Ibíd.*

²⁶ YANG, Yan y LI, Zi Li, «Double Inlet Cyclone Separators for Natural Gas Dehydration», *Applied Mechanics and Materials*, 2011, <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.44-47.1002>.

2. MODELO MATEMÁTICO

Para hacer uso de La Dinámica Computacional de Fluidos con el fin de estudiar la separación gas-líquido en un separador GLCC es necesario el uso de la herramienta computacional ANSYS Fluent 18.0. Este *software* describe el comportamiento fluidodinámico de las sustancias por medio de ecuaciones diferenciales parciales de gran complejidad las cuales son resueltas por medio de métodos numéricos en cada uno de los volúmenes de control. En este capítulo se muestran las ecuaciones que hacen parte del modelo matemático y los métodos numéricos aplicados para su resolución.

2.1 ECUACIONES DE TRANSPORTE

El flujo en el ciclón es considerado incompresible y bifásico, por lo cual, las ecuaciones de continuidad y cantidad de movimiento se expresan de la siguiente forma:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_m) + \nabla \cdot (\rho_m \vec{v}_m) = 0 \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t}(\rho_m \vec{v}_m) + \nabla \cdot (\rho_m \vec{v}_m \vec{v}_m) & \quad (2) \\ = -\nabla p + \nabla \cdot [\mu_m(\nabla \vec{v}_m + \nabla \vec{v}_m^T)] + \rho_m \vec{g} + \vec{F} - \nabla \cdot \left(\sum_{k=1}^n \alpha_k \rho_k \vec{v}_{dr,k} \vec{v}_{dr,k} \right) \end{aligned}$$

Cada uno de los parámetros de mezcla usados en las ecuaciones anteriores se definen en la sección 2.3, Modelo de Flujo Multifásico.

2.2 MODELO DE TURBULENCIA

La turbulencia es el movimiento inestable e irregular del fluido en el que las cantidades transportadas como masa y cantidad de movimiento fluctúan en el espacio y el tiempo. Además, las propiedades de la mezcla como su densidad y velocidad presentan variaciones aleatorias en donde es posible identificar la formación de remolinos. Teóricamente, todos los flujos turbulentos pueden ser simulados mediante la resolución numérica de las ecuaciones de Navier-Stokes. Sin embargo, esto requiere de un costo computacional extremadamente elevado el cual no es práctico para flujos a escala industrial²⁷.

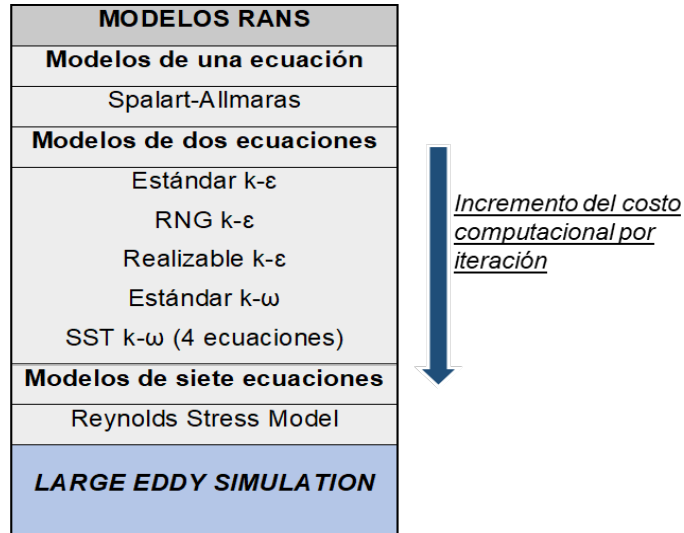
Para disminuir el costo computacional, los campos de flujo turbulentos pueden ser calculados con los sistemas de ecuaciones de conservación promediadas en el espacio y tiempo. Cuando se hace esta aproximación, el sistema de ecuaciones resultante contendrá más incógnitas que ecuaciones. Este inconveniente puede ser solucionado mediante la adición de los modelos de turbulencia, los cuales, están diseñados para aproximar el comportamiento físico de la turbulencia.

Estos modelos se dividen en dos grupos *Reynolds Average Navier-Stokes*, (o RANS) y *Large Eddy Simulation*, (LES); adicionalmente pueden ser clasificados por el número de ecuaciones que utilizan. En la **Figura 10** se muestra la clasificación de los modelos de turbulencia.

El modelo de turbulencia usado en el presente trabajo es el Realizable k- ϵ , el cual es robusto y de precisión razonable, además no requiere grandes costos computacionales. Este modelo es el más usado en aplicaciones industriales, incluyendo flujos con fluidos rotatorios los cuales se encuentran el separador a estudiar.

²⁷ ANSYS, Inc., «ANSYS Fluent Theory Guide 18.0», enero de 2017.

Figura 10: Modelos de turbulencia



Fuente: Modificado de *ANSYS Fluent Theory Guide 18.0*²⁸

Las ecuaciones de transporte para este modelo se muestran a continuación:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \varepsilon - Y_M + S_k \quad (3)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \varepsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (G_k + G_{3\varepsilon} G_b) - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} + S_\varepsilon \quad (4)$$

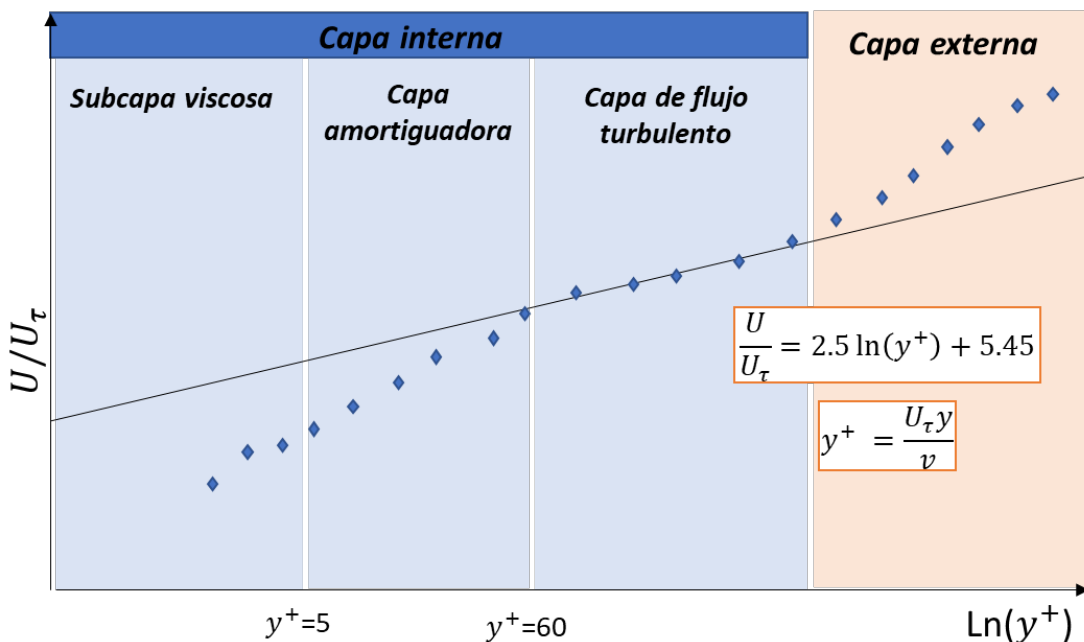
En donde la ecuación (3) muestra la primera variable, la energía cinética turbulenta, k y la ecuación (4) muestra la segunda variable, la disipación de la energía cinética turbulenta (ε). Además, la viscosidad turbulenta (μ) se calcula con la ecuación (5).

²⁸ *Ibíd.*

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (5)$$

Una de las limitaciones del modelo k-ε es la imposibilidad de resolver la ecuación para ε en las paredes, por lo cual, es necesario la utilización de una función de pared (*Wall Function*). La función utilizada es la estándar, la cual aplica una correlación logarítmica para suministrar las condiciones de frontera de la pared, es decir en la capa interna la cual se muestra en la **Figura 11**. Esta capa interna está dividida en la subcapa viscosa, capa amortiguadora y capa de flujo turbulento. La correlación utiliza la distancia adimensional entre la subcapa viscosa y la pared, denominada y^+ ²⁹. Para la función estándar, el y^+ debe ser mayor a 11.

Figura 11: Capa interna



²⁹ ANSYS, Inc., «ANSYS Fluent Theory Guide 18.0».

2.3 MODELO DE FLUJO MULTIFÁSICO

Para modelar el flujo multifásico en el separador GLCC se utiliza la aproximación Euler-Euler. Esta aproximación trata a las diferentes fases como si fueran continuas. Para su aplicación, es necesario derivar las ecuaciones de conservación para cada fase obteniendo un grupo de ecuaciones a resolver. Hay tres modelos multifase disponibles en ANSYS Fluent 18.0: Volumen de Fluido (VOF por sus siglas en inglés, *Volume of fluid*), Modelo de Mezcla (*Mixture model*) y Modelo Euleriano (*Eulerian model*).

El Modelo de Mezcla es seleccionado para el presente trabajo. Este, se puede usar para modelar flujos multifásico donde sus fases se mueven a diferentes velocidades, pero asumiendo equilibrio local. El modelo puede modelar n fases resolviendo las ecuaciones de momento, continuidad y energía para la mezcla y las ecuaciones de fracción volumétrica para la fase secundaria. Las aplicaciones más comunes incluyen la sedimentación y separadores ciclónicos. Además de asumirse continuas, las fases se asumen como interpenetrantes. Las ecuaciones constitutivas del modelo se presentan a continuación:

✓ Densidad promedio
$$\rho_m = \sum_{k=1}^n a_k \rho_k \quad (6)$$

✓ Velocidad promedio
$$\vec{v}_m = \frac{\sum_{k=1}^n a_k \rho_k \vec{v}_k}{\rho_m} \quad (7)$$

✓ Cambio de velocidad (*drift velocity*)
$$\vec{v}_{dr,k} = \vec{v}_k - \vec{v}_m \quad (8)$$

✓ Velocidad de deslizamiento
$$\vec{v}_{pq} = \vec{u}_p - \vec{u}_q \quad (9)$$

✓ Relación entre las velocidades
$$\vec{v}_m = \vec{v}_{pq} - \frac{\sum_{k=1}^n a_k \rho_k \vec{v}_{qk}}{\rho_m} \quad (10)$$

2.4 MODELO NUMÉRICO

La solución de las ecuaciones del modelo matemático ha sido implementada en ANSYS Fluent 18.0 por la aplicación del método de volúmenes finitos. El objetivo de este método es obtener un sistema de ecuaciones algebraicas por cada volumen de control del sistema. En el desarrollo de la solución, las variables se conservan a través de cada uno de los elementos. Así, cuando una cantidad sale de un volumen de control, la misma cantidad entra al siguiente volumen de control adyacente. Una de las ventajas del método de volúmenes finitos es el mantenimiento del significado físico de las ecuaciones de transporte luego de su discretización. Además, es efectivo computacionalmente ya que el cálculo de alguna cantidad transportada para dos volúmenes de control adyacentes es el mismo, pero con signo contrario³⁰. La discretización de las ecuaciones de transporte se puede ver más fácilmente considerando la ecuación de conservación no estacionaria para una cantidad de transporte determinada φ , escrita en forma integral para un volumen de control arbitrario V , mostrada a continuación³¹:

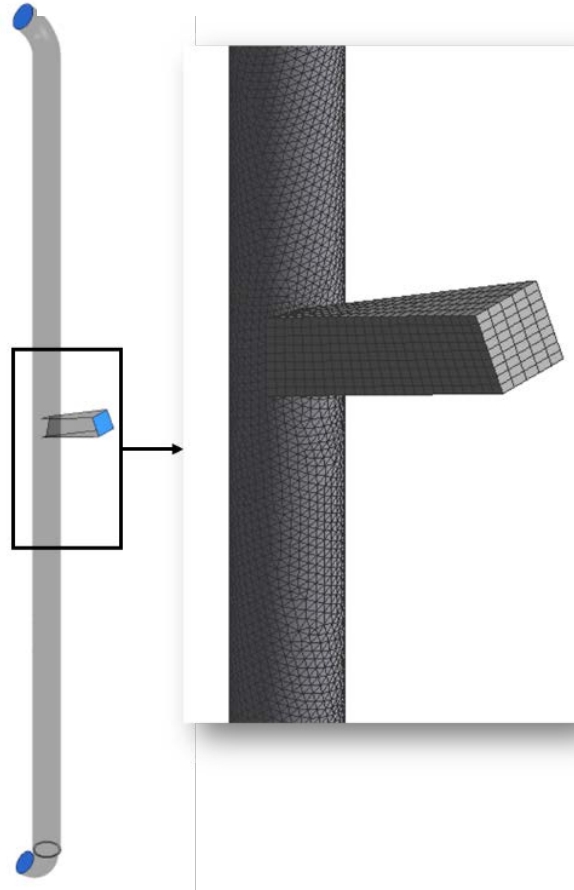
$$\int_V \frac{\partial \rho \varphi}{\partial t} dV + \oint \rho \varphi \vec{V} \cdot d\vec{A} = \oint \Gamma_\varphi \nabla \varphi \cdot d\vec{A} + \int_V S_\varphi dV \quad (11)$$

Para aplicar el método es necesario discretizar el dominio del sistema a estudiar en un número finito de volúmenes de control, en la **Figura 12** se puede observar un ejemplo de discretización del separador GLCC en 289.424 elementos o volúmenes de control.

³⁰ CHUNG, T. J. *Computational fluid dynamics*. Cambridge university press, 2010.

³¹ PRIETO, Natalia, *Simulação da combustão de coque em regeneradores FCC usando fluidodinâmica computacional*, 2011.

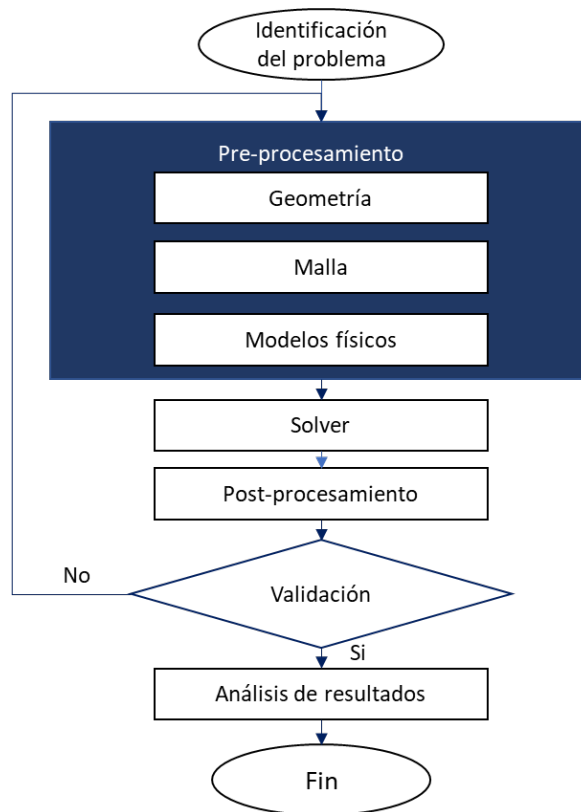
Figura 12: Discretización del separador GLCC



3. METODOLOGÍA

En el presenta capítulo se muestra la metodología utilizada para hacer la simulación numérica del separador tipo GLCC. La primera etapa consiste en la identificación del problema en donde se define el dominio del trabajo de simulación. Luego, se hace el Pre-procesamiento el cual se compone de la creación de la geometría, la generación de la malla y la selección de los modelos físicos que reproducen la física de los fluidos en el dominio. En la tercera etapa, se da solución a los modelos físicos establecidos (*Solver*) para luego hacer el Post-procesamiento de los datos de la solución. Por último, si el modelo matemático se valida correctamente mediante datos experimentales, se procede a hacer el análisis de los resultados. La metodología propuesta se presenta en la **Figura 13**.

Figura 13: Metodología



3.1 IDENTIFICACIÓN DEL PROBLEMA

En el presente trabajo se analiza el comportamiento fluido-dinámico de una mezcla gas-liquido en un separador GLCC y el efecto del ángulo de la boquilla de entrada en la formación del ciclón. Para tal fin, se construyen tres prototipos de separadores con diferentes ángulos de la boquilla de entrada, 27°, 36° y 45°. El modelo fue validado a partir de los datos experimentales de la geometría propuesta por HREIZ, Rainier *et al* (2014)³². Las sustancias utilizadas son una mezcla aire-agua para la primera parte de las simulaciones, luego se utiliza una mezcla de gas natural con la geometría que tuvo mejores resultados.

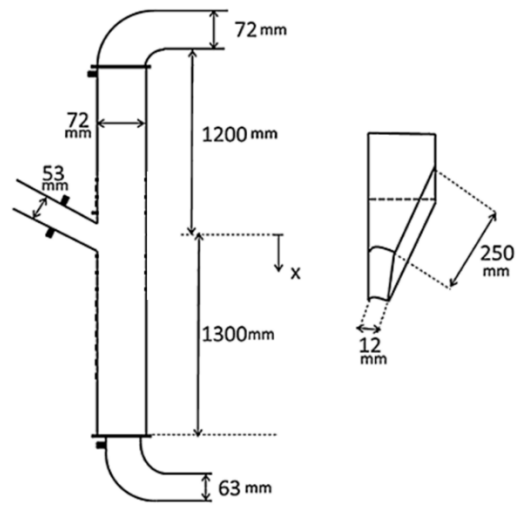
3.2 PRE-PROCESAMIENTO

El Pre-procesamiento corresponde a la primera etapa del trabajo de simulación, donde se define el dominio mediante la creación de la geometría. Posteriormente es necesaria la discretización de este dominio mediante la creación de la malla. Se definen también los modelos físicos apropiados para recrear el comportamiento fluido-dinámico en el separador y las propiedades de los fluidos involucrados en el proceso, así como las condiciones de frontera para cada caso de simulación.

3.2.1 Geometría: La creación de la geometría tridimensional se hace mediante el programa de diseño *Design Modeler*, disponible en el paquete de servicios del software ANSYS 18.0. Las dimensiones son tomadas de la geometría propuesta por HREIZ, Rainier *et al* (2014) se muestran en la **Figura 14**. Además, se hacen dos variaciones al ángulo de la boquilla de entrada a 36° y 45°. Las geometrías se muestran en la **Figura 15**.

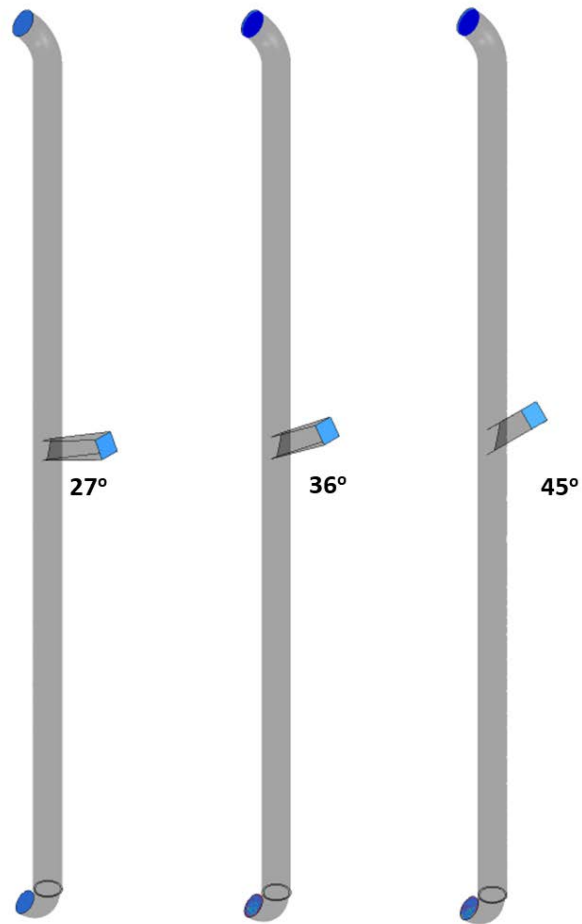
³² HREIZ, Rainier et al., «Hydrodynamics and velocity measurements in gas–liquid swirling flows in cylindrical cyclones», *Chemical Engineering Research and Design* 92, n.º 11 (1 de noviembre de 2014): 2231-46, <https://doi.org/10.1016/j.cherd.2014.02.029>.

Figura 14: Dimensiones del separador



Fuente: Modificado de HREIZ, Rainier et al (2014)³³

Figura 15: Geometrías propuestas



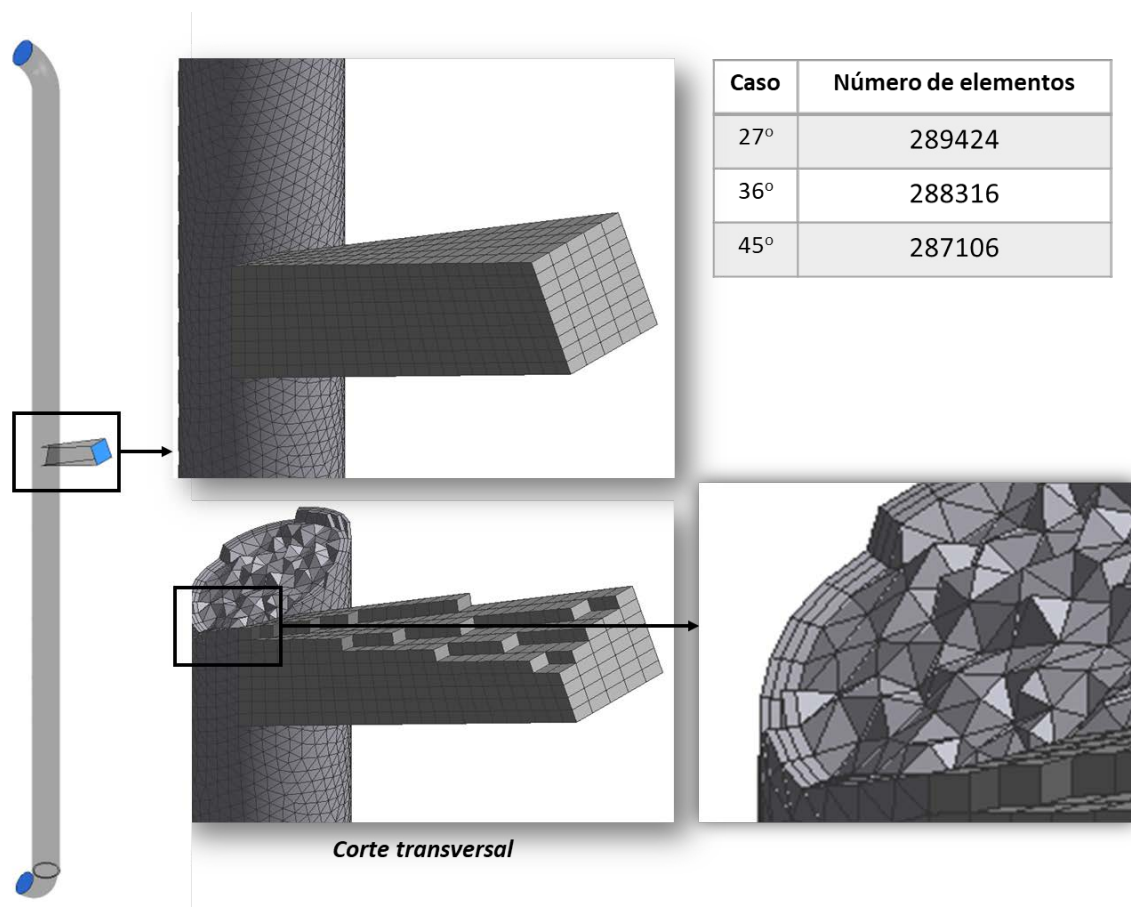
³³ *Ibid.*, p. 3.

3.2.2 Malla: La discretización del dominio se hace mediante el programa *Meshing*, disponible en el paquete de servicios del software ANSYS Fluent 18.0. La malla que se genera con mejores propiedades está compuesta por tetraedros en el cilindro principal y hexaedros en la boquilla de entrada. Además, cuenta con un refinamiento de tres capas hecho mediante la herramienta *Inflation* en las paredes del cilindro. En la **Figura 16** se muestran la malla generadas para la geometría de 27° y el número de elementos final para cada caso.

Para conocer si la cantidad de elementos en los cuales se ha dividido el dominio es la adecuada se hace un test de independencia de malla. Este test consiste en incrementar la cantidad de volúmenes de control en el dominio y comparar los resultados obtenidos de una variable seleccionada con los de la malla anterior para verificar si hay algún cambio significativo. Si hay un cambio en los resultados se debe seguir aumentando la cantidad de elementos hasta que los resultados no tengan una variación significativa y sean independientes del número de elementos del dominio. Es importante también, utilizar la malla con el mínimo de elementos posibles que tengan resultados independientes ya que a mayor número de elementos el esfuerzo computacional será mayor.

3.2.3 Modelos físicos: Como se estableció en el capítulo anterior, los modelos físicos usados para representar el comportamiento fluido-dinámico en el ciclón son los siguientes: Para la turbulencia se usa el modelo Realizable k- ϵ con función de pared estándar y para el flujo multifásico se usa el modelo de mezcla.

Figura 16: Malla



3.2.4 Sustancias: Los fluidos utilizados para validar el modelo matemático son una mezcla de agua y aire cuyas propiedades se muestran en la **Tabla 2**. Posteriormente, se utilizó una mezcla de gas natural del campo Cusiana en el departamento de Casanare en Colombia, la composición de este gas se muestra en la **Tabla 3**.

Tabla 2: Propiedades del agua y aire

Sustancia	Densidad (kg/m ³)	Viscosidad dinámica (kg/m*s)
Agua	998.2	1.003x10 ⁻³
Aire	1.125	1.7894x10 ⁻⁵

Tabla 3: Composición inicial del gas natural

Compuesto	%molar
Metano	82.19
Etano	10.43
Propano	3.59
Butano	1.02
Pentano	0.12
Hexano	0.02
Nitrógeno	0.65
Dióxido de carbono	1.97

Fuente: AMELL, Andres A, BEDOYA, Cesar A, y SUAREZ, Bladimir ³⁴

3.2.5 Condiciones de frontera: Las condiciones de frontera se establecen para cada una de superficies que componen el dominio. Estas superficies son la entrada, la salida superior e inferior y la pared. Para la entrada, se establece una condición de velocidad en donde el flujo entra de manera normal a la superficie y para las salidas se establece una condición de presión. Por último, para la pared se establece una condición de no deslizamiento (*No slip*). Los valores utilizados para las

³⁴ AMELL, Andres A, BEDOYA, Cesar A, y SUAREZ, Bladimir, «Efectos del cambio de composición química del gas natural sobre el comportamiento de turbina a gas: Una aproximación al caso colombiano», 2006.

condiciones de frontera para hacer la validación de los resultados son establecidos por HREIZ, Rainier et al (2014)³⁵ y se muestran junto a los valores establecidos para hacer la simulación con el gas natural en la **Figura 17**. El proceso se lleva de manera isotérmica y las simulaciones se hacen en estado estable.

Figura 17: Condiciones de frontera

Sustancia	Superficie	Condición	Valor		Unidades
Aire-agua	Entrada	Velocidad	Aire	3.46	m/s
			Agua	0.69	
	Salidas	Presión (estática)	0		Pa
	Pared	No deslizamiento			
Gas natural	Entrada	Velocidad	3.46		m/s
	Salidas	Presión (estática)	0		Pa
	Pared	No deslizamiento			

3.3 SOLUCIÓN

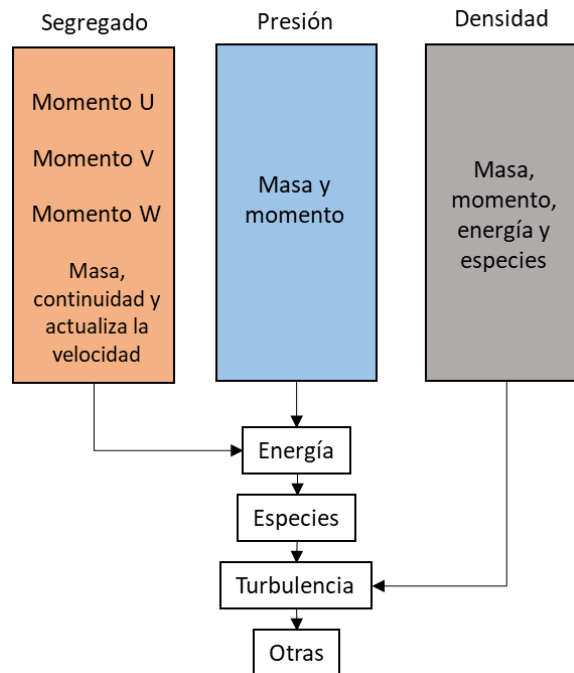
En esta etapa, el software utilizado resuelve las ecuaciones del modelo matemático mediante el método de volúmenes finitos. Para ello, *Fluent* cuenta con dos tipos de procedimientos de solución o *Solvers* basados en la densidad o en la presión. Estos, resuelven las ecuaciones de transporte en diferente orden y se presentan en la **Figura 18**. El *Solver* basado en la presión (*Pressure-based*) es el utilizado en el presente trabajo, tomando el momento y la presión como las variables primarias.

Los métodos de interpolación escogidos para el término convectivo y para la presión son el QUICK (*Quadratic Upstream Interpolation for Convective Kinematics*) y PRESTO! (*PREssure STaggering Option*) respectivamente.

³⁵ . *Ibíd.*, p. 5.

Estos métodos son seleccionados por su capacidad para solucionar las ecuaciones de transporte en el flujo centrifugo.

Figura 18: Solvers



Fuente: Modificado de ANSYS Fluent Theory Guide 18.0³⁶

3.4 POST-PROCESAMIENTO

Para hacer el Post-procesamiento de las simulaciones se utiliza la herramienta *CFD-Post* la cual permite visualizar los resultados mediante la creación de contornos, perfiles y graficas de las variables a estudiar (velocidad y fracción volumétrica). Los resultados y su respectivo análisis se presentan en el siguiente capítulo.

³⁶ ANSYS, Inc., «ANSYS Fluent Theory Guide 18.0».

4 ANÁLISIS DE RESULTADOS

En el presente capítulo se presentan los resultados de las simulaciones y el análisis de las variables a estudiar para cada uno de los casos. Primeramente, se hizo el test de independencia de malla para poder determinar el número de volúmenes de control suficientes para hacer la validación del modelo mediante la comparación de datos experimentales. Luego, se analizaron los resultados para cada variación del ángulo de la boquilla a fin de seleccionar en cual el ciclón formado tiene las mejores características para la separación gas-líquido. Posteriormente se hace la simulación para la mezcla de gas natural del campo Cusiana.

4.2 TEST DE INDEPENDENCIA DE MALLA

Para hacer el test de independencia de malla se mide la velocidad de la mezcla aire-agua a tres alturas diferentes: a 1; 1,15 y 1,3 metros de la base del separador y a 0,004 metros del centro como se muestran en la **Figura 19**. Luego, se grafica el valor de velocidad en ese punto para todas las siete mallas hechas al disminuir el tamaño de los elementos desde 11 hasta 5 milímetros, un milímetro cada vez. Los valores de velocidad se estabilizan a partir de la malla con 265.251 elementos, por lo cual es la que se utiliza para las simulaciones posteriores (**Figura 20**).

Figura 19: Puntos seleccionados para el test de malla

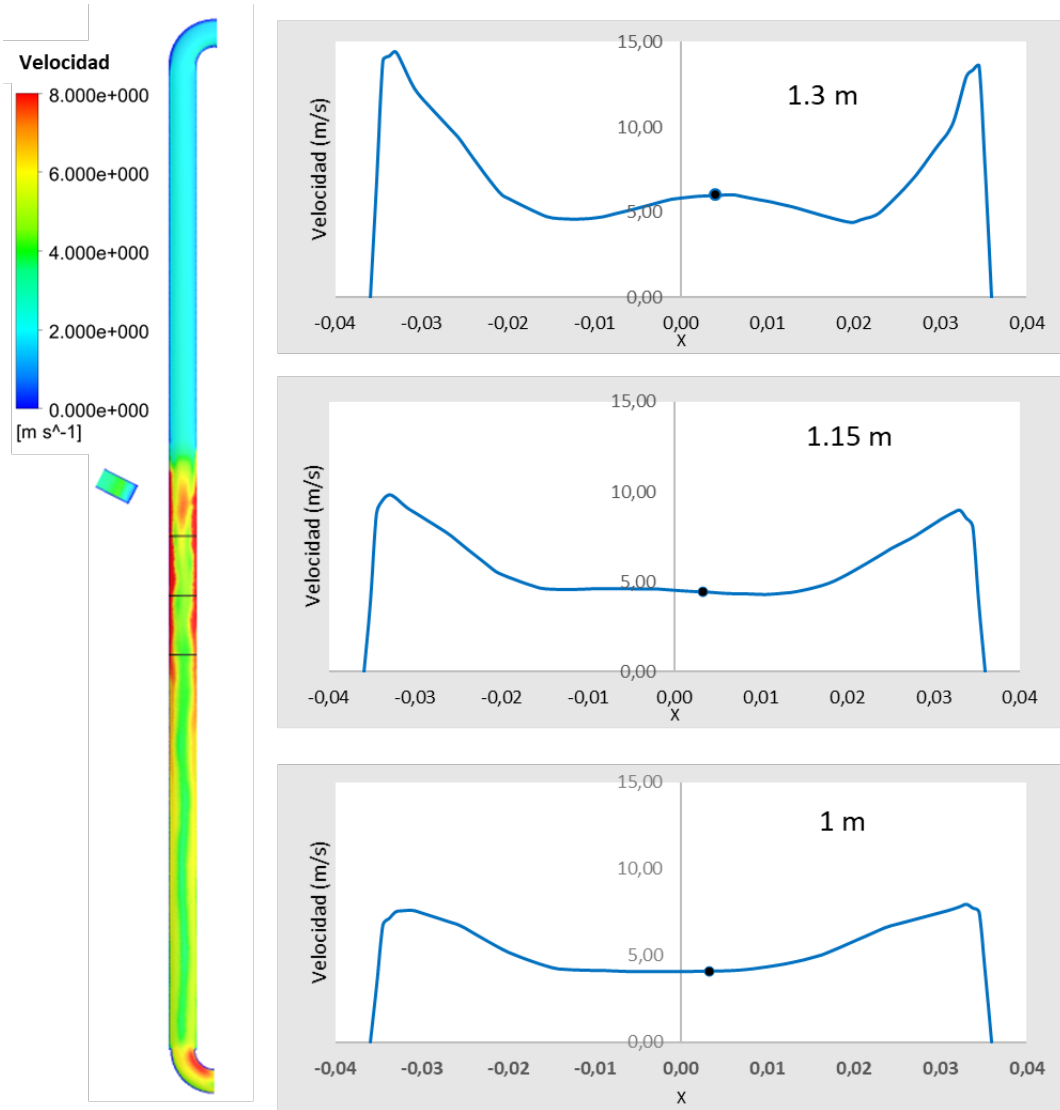
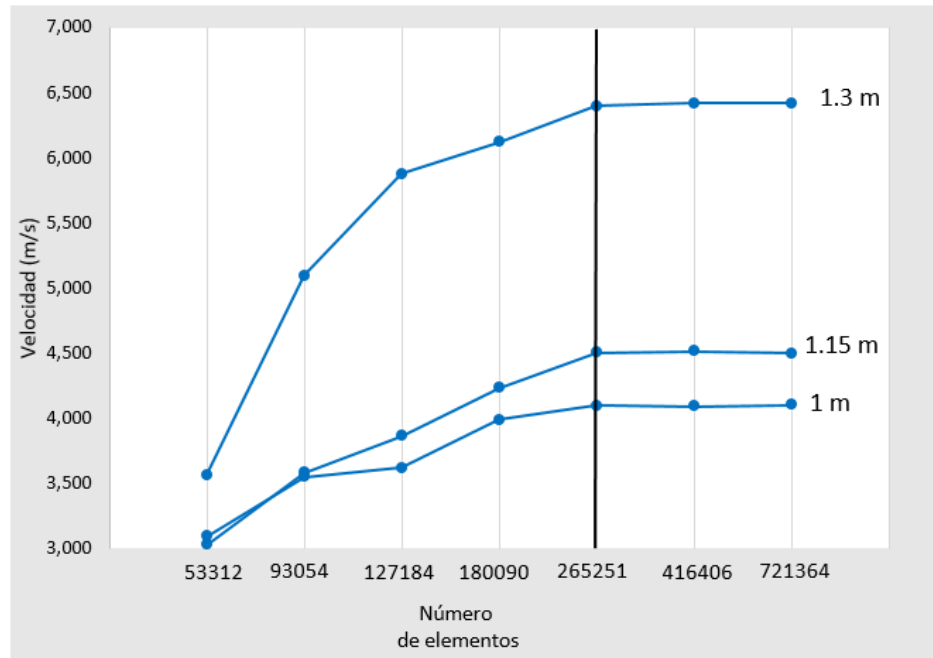


Figura 20: Test de malla



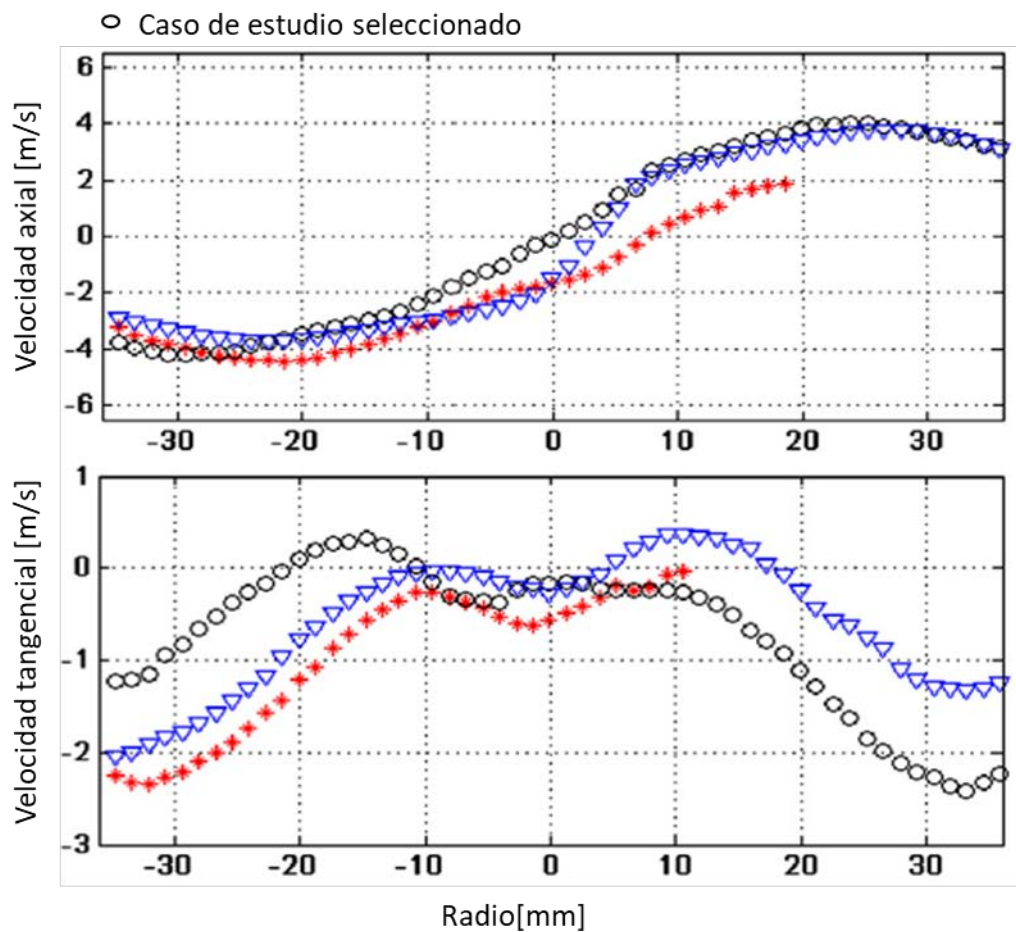
4.3 VALIDACIÓN DEL MODELO

La validación del modelo se hace mediante la comparación de los resultados con los datos experimentales hallados por HREIZ, Rainier *et al* (2014)³⁷. Las medidas experimentales fueron la velocidad axial y tangencial en el ciclón a 0.6 metros por debajo de la boquilla a diferentes condiciones de flujo, en la **Figura 21** se muestran las mediciones hechas y el caso estudio seleccionado para el presente trabajo (círculos negros). Según la **Figura 22** y la **Figura 23** los modelos matemáticos escogidos reproducen correctamente la fluidodinámica en el ciclón debido a que los datos experimentales y hallados en la simulación tienen el mismo comportamiento y sus valores presentan una desviación estándar de 0,26 m/s en promedio.

³⁷ HREIZ, Rainier *et al.*, Hydrodynamics and velocity measurements in gas-liquid swirling flows in cylindrical cyclones.

También se hace la comparación de los resultados de simulación sin refinamiento en la pared de la malla en la **Figura 24**. Estos valores difieren en mayor medida a los datos experimentales, mostrando la importancia de un correcto mallado para la obtención de resultados aceptables.

Figura 21: Velocidad axial y tangencial experimentales



Fuente: Modificado de HREIZ, Rainier *et al* (2014)³⁸

³⁸ *Ibid.*, p. 6

Figura 22: Validación velocidad tangencial

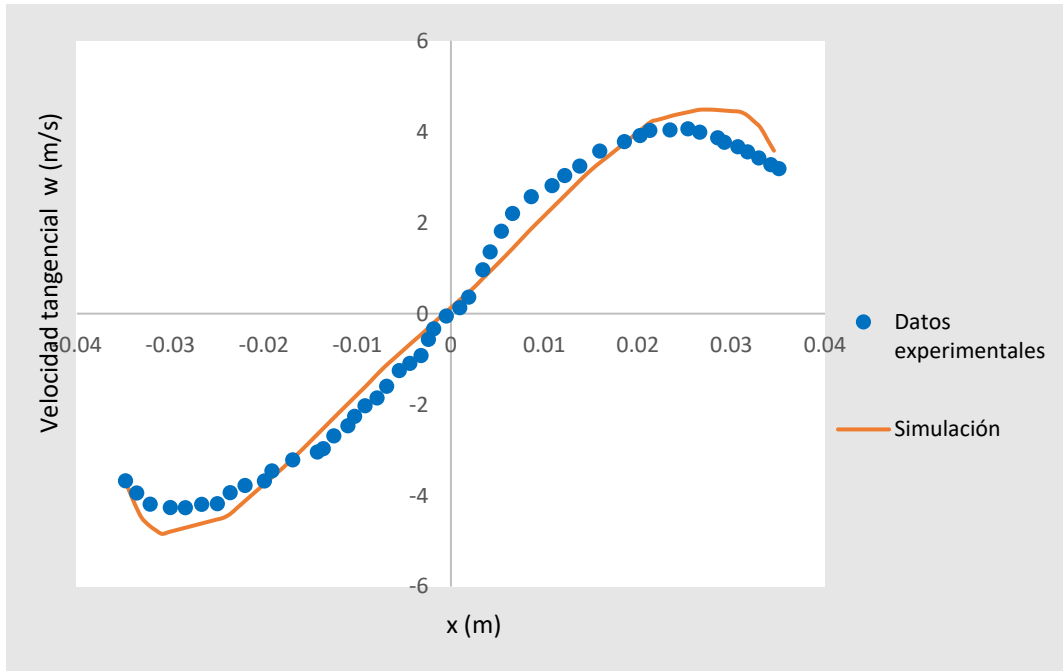


Figura 23: Validación velocidad axial

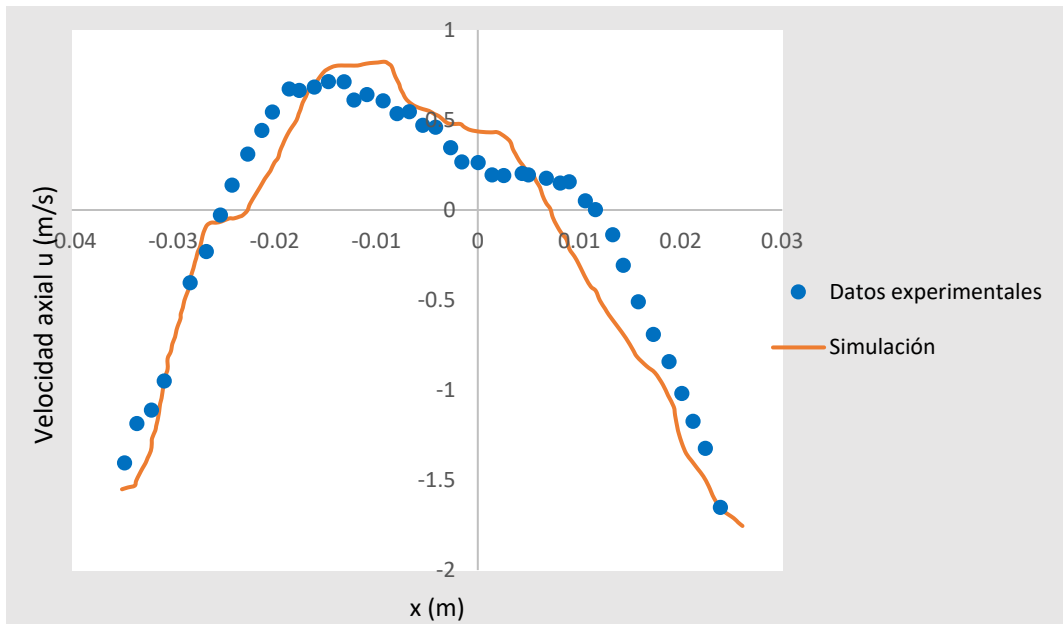
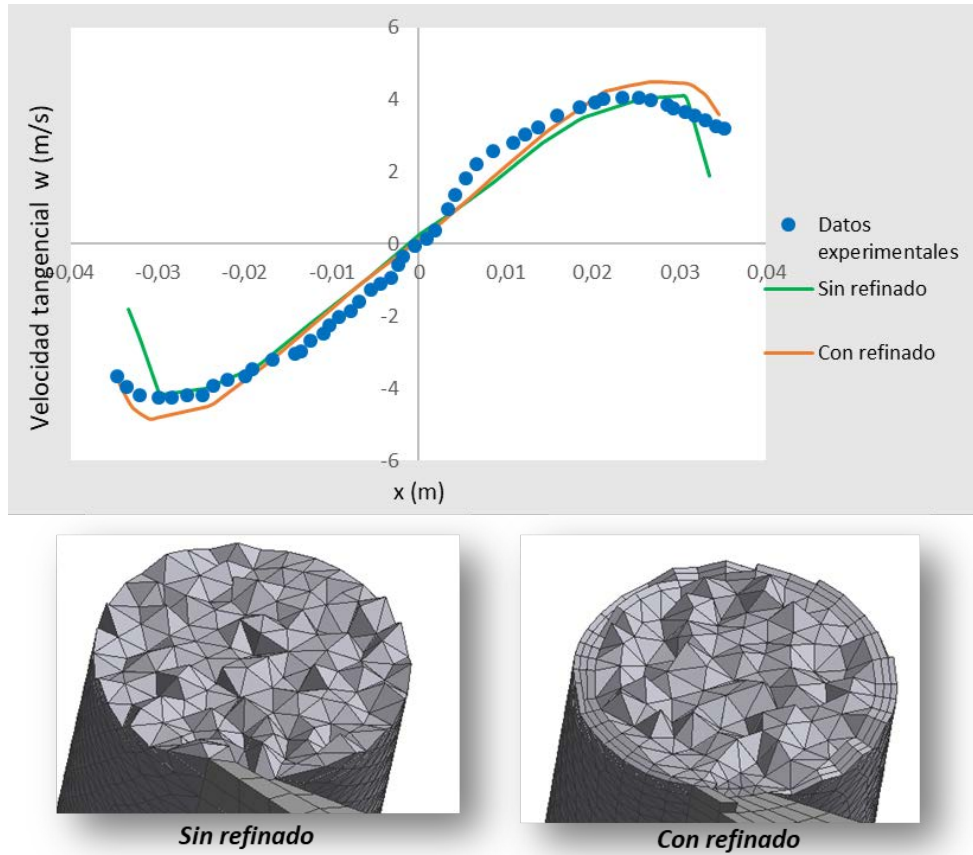


Figura 24: Efecto del refinamiento

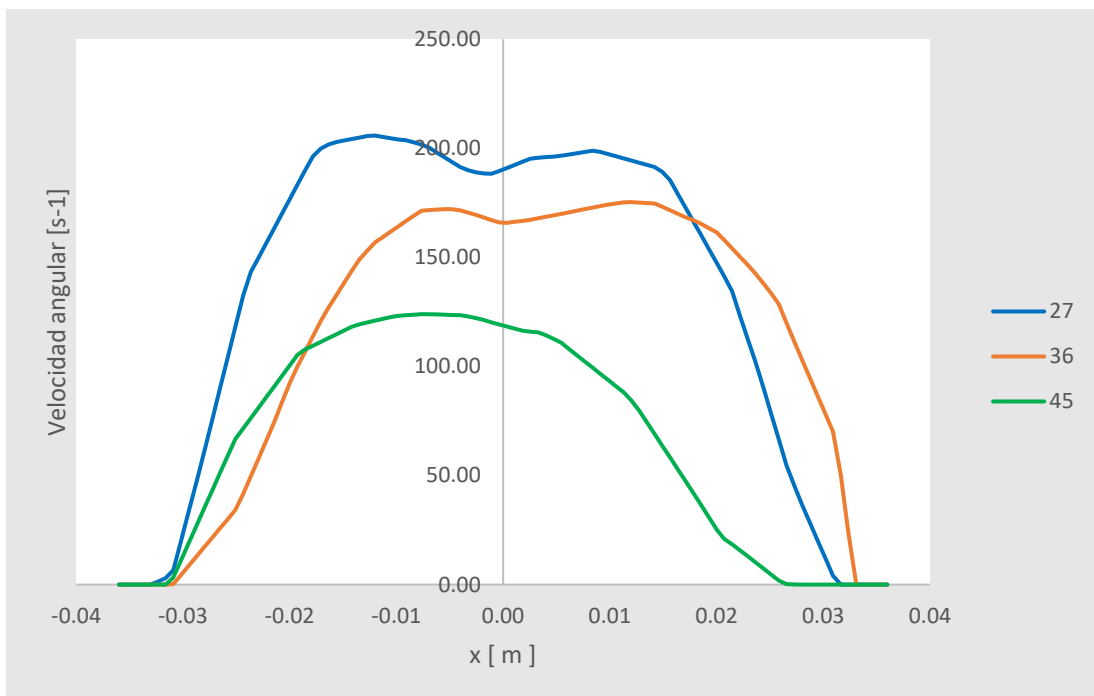


4.2 ANÁLISIS PARA LA MEZCLA AIRE-AGUA

En esta parte del trabajo se analizan la velocidad, presión y fracciones volumétricas de gas y líquido en el separador mediante herramientas gráficas como vectores, contornos y líneas de flujo hechas mediante la herramienta *CFD-Post*. Estos resultados corresponden a las simulaciones de la mezcla aire-agua para cada una de las geometrías propuestas.

4.2.1 Velocidad: La separación de las fases es causada por las fuerzas centrífugas las cuales dependen de la intensidad del vórtice generado. Por ello, se relaciona la intensidad del vórtice en el separador con la velocidad angular la cual se mide a 0,6 metros de la boquilla de entrada. En la **Figura 25** se muestra la velocidad angular en función de la posición para cada ángulo de la boquilla de entrada estudiado. Se puede observar que a medida que aumenta el ángulo, la velocidad angular en el ciclón es menor, disminuyendo la intensidad del vórtice y por consiguiente también la capacidad del para separar las dos fases. En sus puntos de mayor velocidad, la boquilla con un ángulo de 27° puede hacer que el ciclón tenga hasta 17% y 66% mayor intensidad que las boquillas de 36° y 45° respectivamente.

Figura 25: Velocidad angular mezcla aire-agua



En la **Figura 26** se pueden ver los contornos de velocidad de la mezcla y en la **Figura 27** la velocidad de las líneas de flujo para cada una de las geometrías generadas. En ellas, se puede observar la formación del ciclón y una velocidad mayor en la boquilla de entrada del separador ya que está diseñada con una restricción en el área de flujo para aumentar la velocidad.

Figura 26: Contornos de velocidad aire-agua

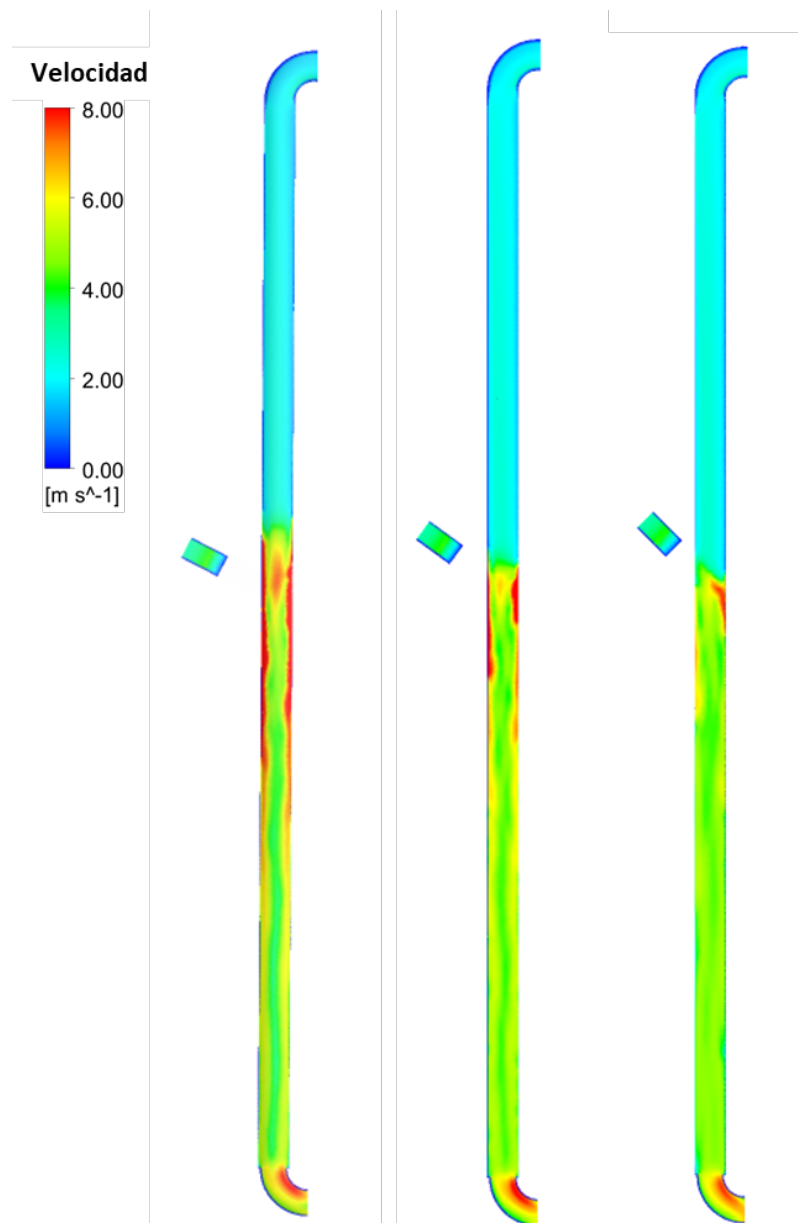
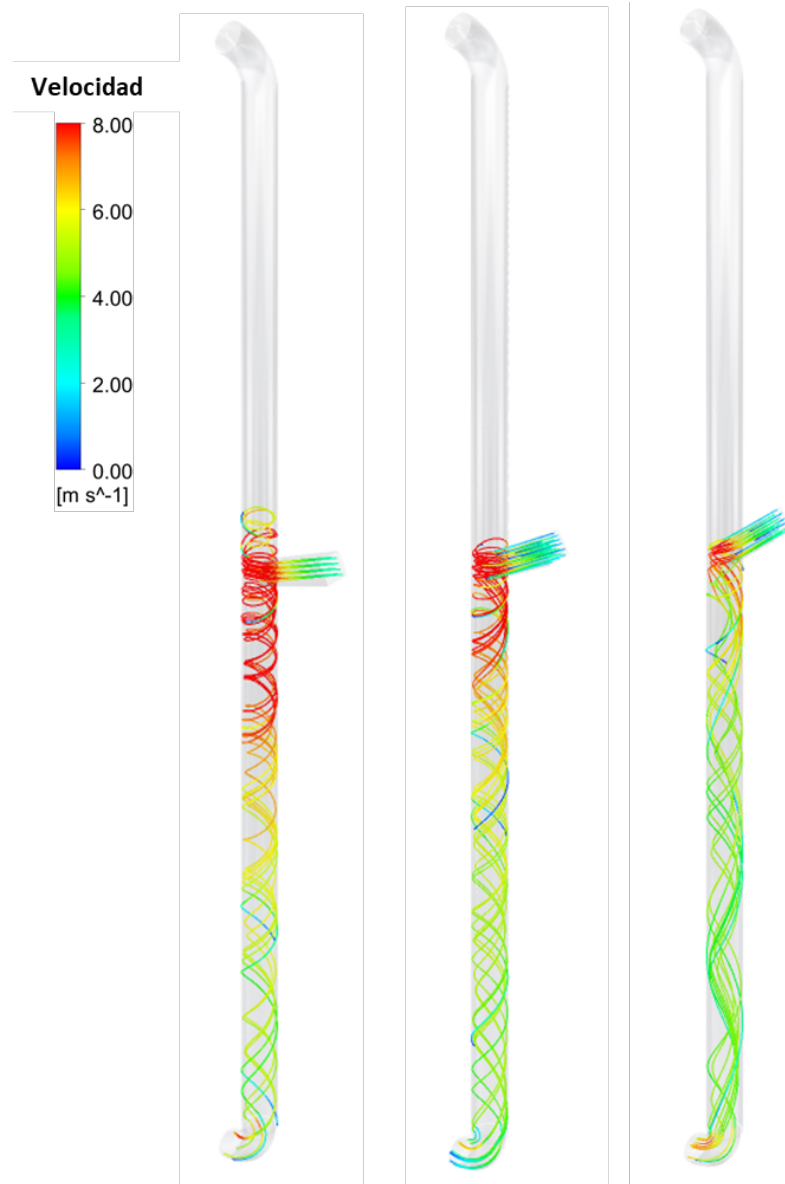


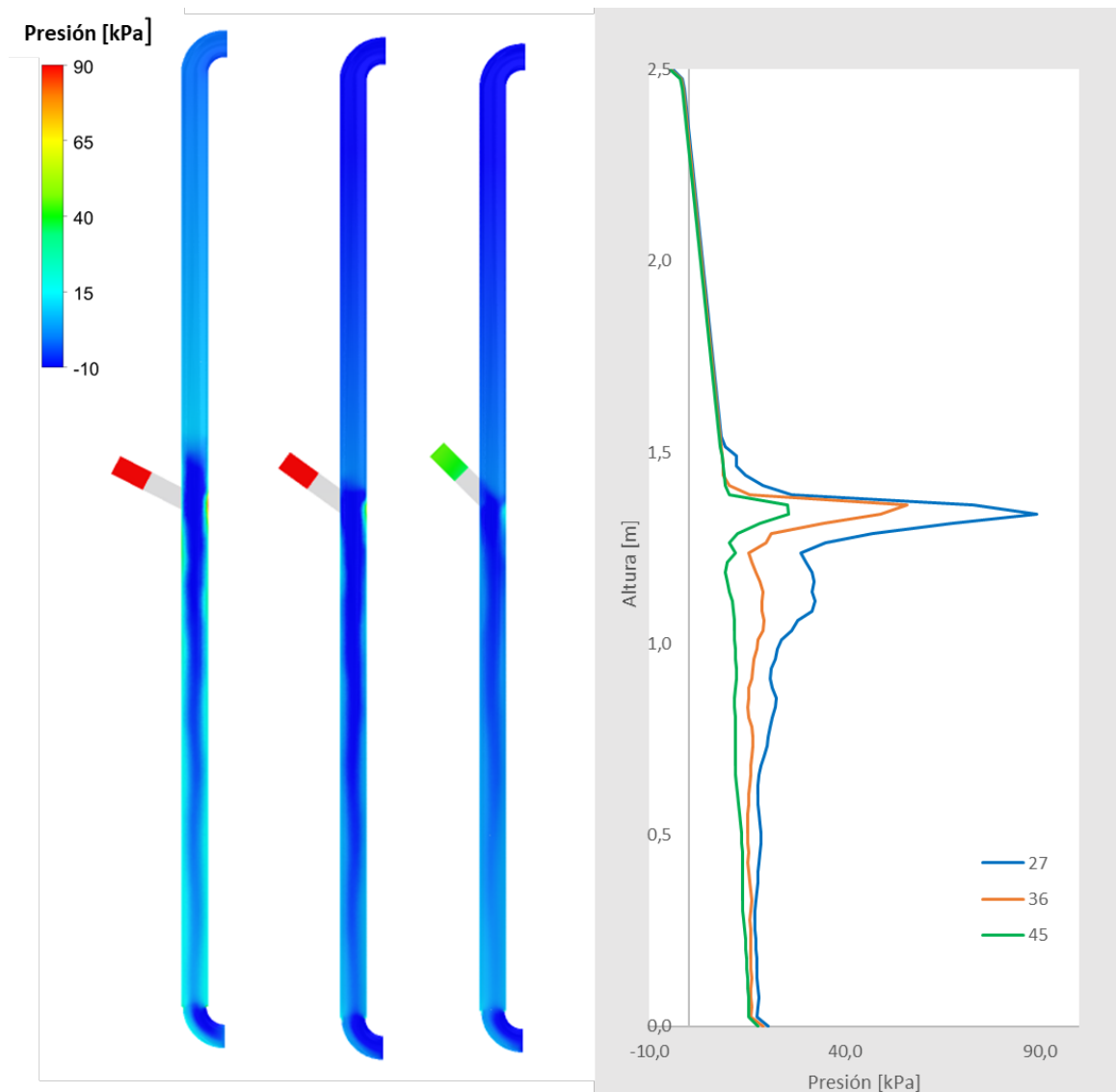
Figura 27: Velocidad líneas de flujo aire-agua



4.2.2 Presión: La **Figura 28** muestra los contornos de presión en el separador para las tres geometrías junto a la relación que tiene con la altura del mismo. La caída de presión entre la salida inferior y superior en el separador para cualquiera de las geometrías es prácticamente la misma, sin embargo, en la región de la boquilla de entrada cambia. Este punto muestra un aumento en la

presión para los tres casos debido a que el fluido entra a una velocidad lineal elevada y se ve obligado a empezar a formar el ciclón cuando se choca con la pared. Esta presión es mayor a cuando el ángulo es menor ya que el cambio de dirección del fluido es más abrupto. Siendo la presión con la boquilla de 27° hasta 1,6 y 3,5 veces mayor que en las boquillas de 36° y 45° respectivamente.

Figura 28: Presión a lo largo del separador mezcla aire-agua



4.2.2 Fracción volumétrica: Como el objetivo del ciclón es separar las dos fases, la fracción volumétrica en el separador muestra que tan efectivo fue este proceso. En la **Figura 30** se muestran los contornos de fracción volumétrica de agua en el ciclón para cada una de las geometrías. Como se puede observar, para los tres casos la fracción volumétrica de agua es mayor en las paredes del separador, esto indica que, la fuerza centrífuga ocasionada por el ciclón, obliga a las gotas de agua a dirigirse radialmente a las paredes, causando la separación de fases. Este comportamiento también puede identificarse en la **Figura 29**, la cual relaciona la fracción volumétrica en el separador en función su radio a una altura de 0,6 metros desde su base. La fracción volumétrica alcanza los valores máximos en las paredes del separador con 0,035; 0,034 y 0.032 para cada una de las geometrías de 27°, 36° y 45°. Por otra parte, en el centro, se encuentran los valores más bajos con 0,005; 0,004 y 0,006 respectivamente.

El gas está presente en todo el dominio debido a que es la fase continua y sale tanto por arriba como por abajo del separador, sin embargo, el gas de la parte de arriba no contiene líquido.

Como se muestra en el análisis de la velocidad, a medida que el ángulo de la boquilla era menor, el ciclón presentaba mejores características para una separación efectiva. Esto se evidencia también en los contornos de fracción volumétrica de agua, ya que las geometrías con menor ángulo presentan una capa de agua en las paredes más uniforme a lo largo de la parte baja del separador. También, para el ángulo de 27°, una parte importante de agua está por encima de la boquilla debido a que el cambio de dirección del fluido es muy fuerte ocasionando que una parte de las gotas vayan a la parte superior. Esto puede generar uno de los problemas operacionales más frecuentes en este tipo de separadores, la entrada de líquido por la parte superior o LCO. Para tener en cuenta este problema, en la **Figura 31** se muestra el flujo másico de agua a lo largo del separador y se evidencia que para los tres casos el flujo de agua

en la parte superior es insignificante, pero se puede apreciar en mayor proporción en la primera geometría.

Para conocer el efecto que podría traer el aumento del flujo de agua en la entrada de líquido a la parte superior del separador se hace una simulación cuando el flujo volumétrico de agua es tres veces mayor al del caso de estudio para la geometría que tiene un ángulo de 27°. A medida que aumenta el flujo volumétrico de agua, el riesgo de tener LCO en el ciclón aumenta y el dispositivo no lograría una separación de la fase efectiva. Los resultados de este caso se presentan en el **Anexo A**.

Mediante el análisis de las variables descritas anteriormente se puede identificar que la boquilla que presenta mejores condiciones para una separación de fases efectiva es la de 36°. Con este ángulo, el vórtice formado tiene buenas características lo que daría la fuerza centrífuga ideal para la separación de las fases, además se previene el LCO en el ciclón.

Figura 29: Fracción volumétrica de agua en el separador en función del radio

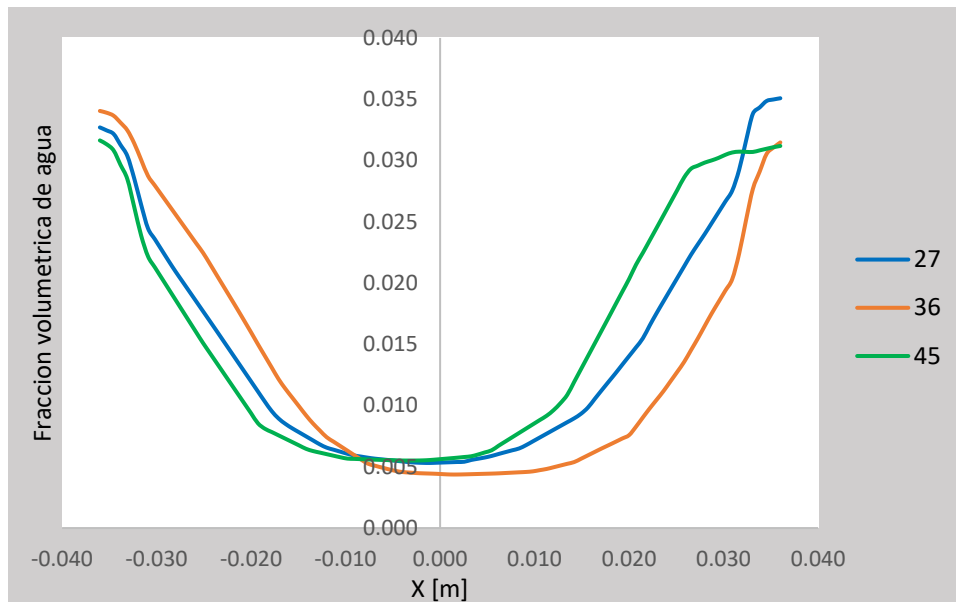


Figura 30: Fracción volumétrica de agua en el separador

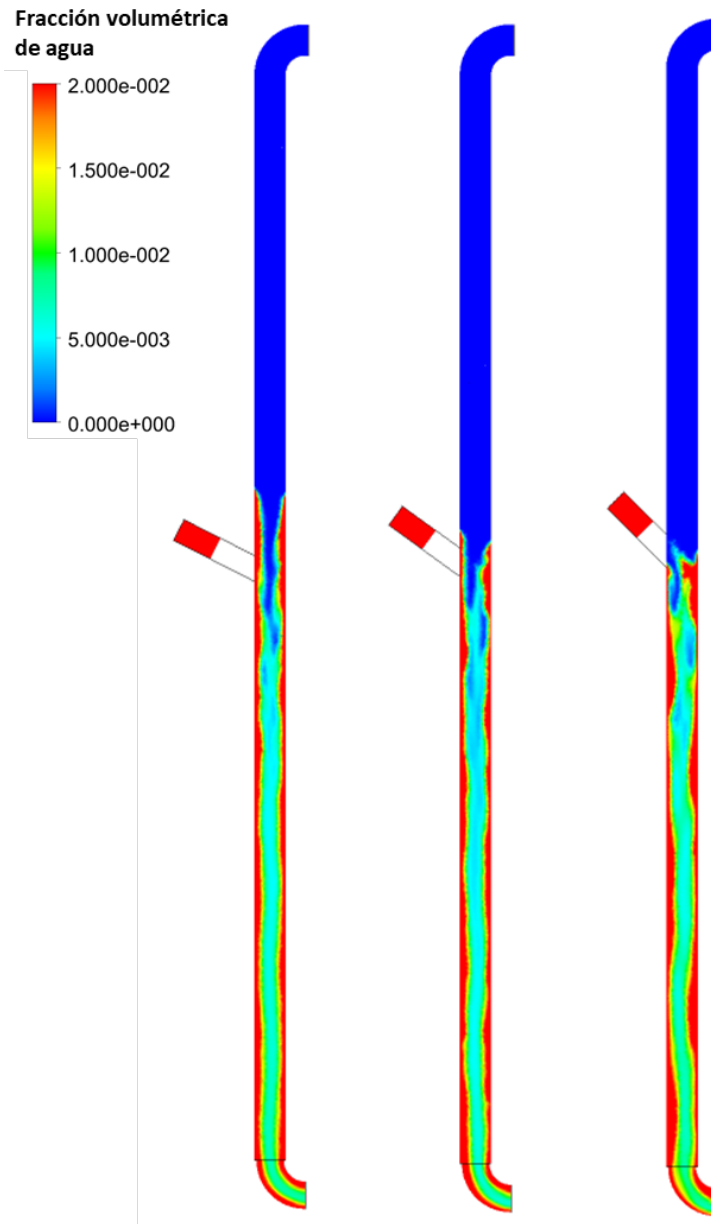
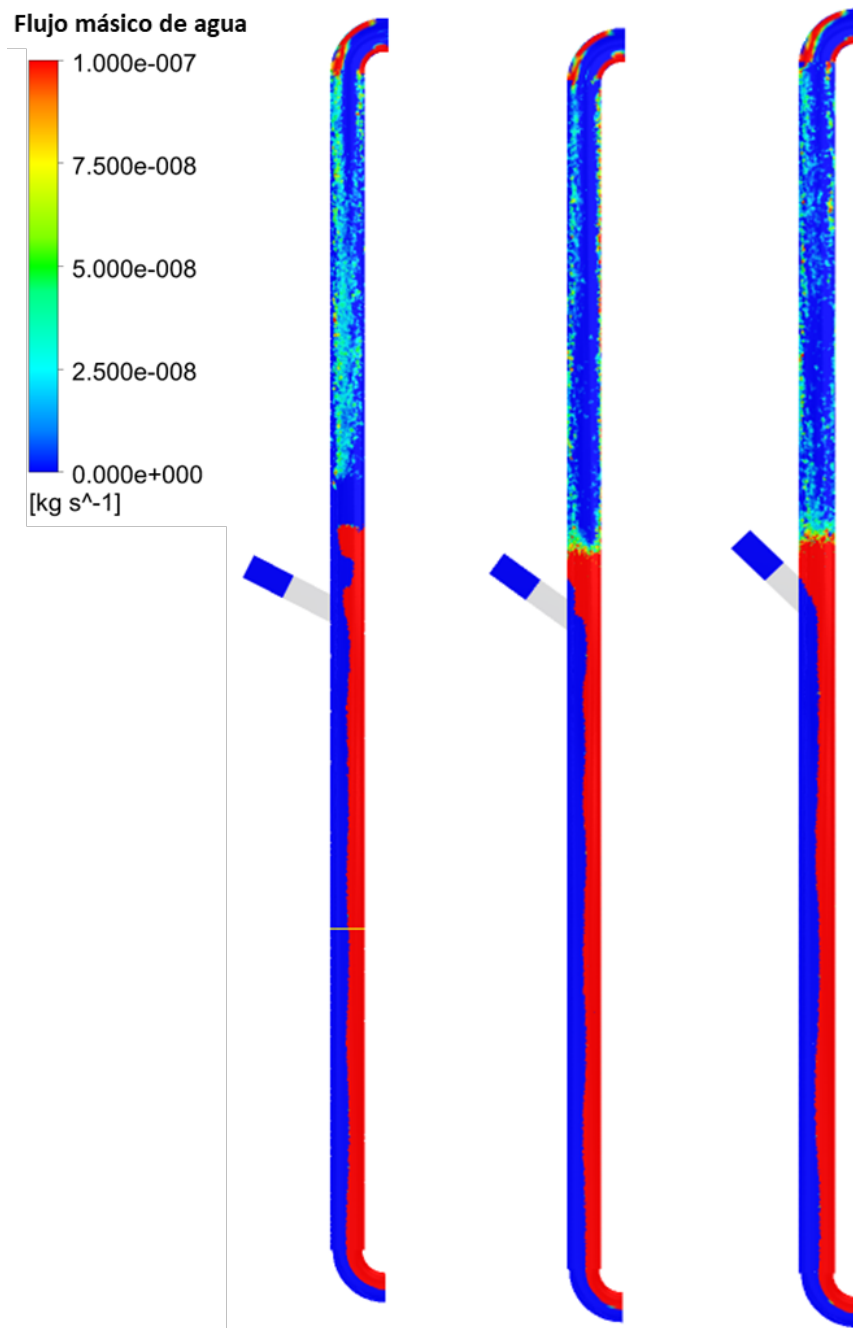


Figura 31: Flujo másico de agua en el separador

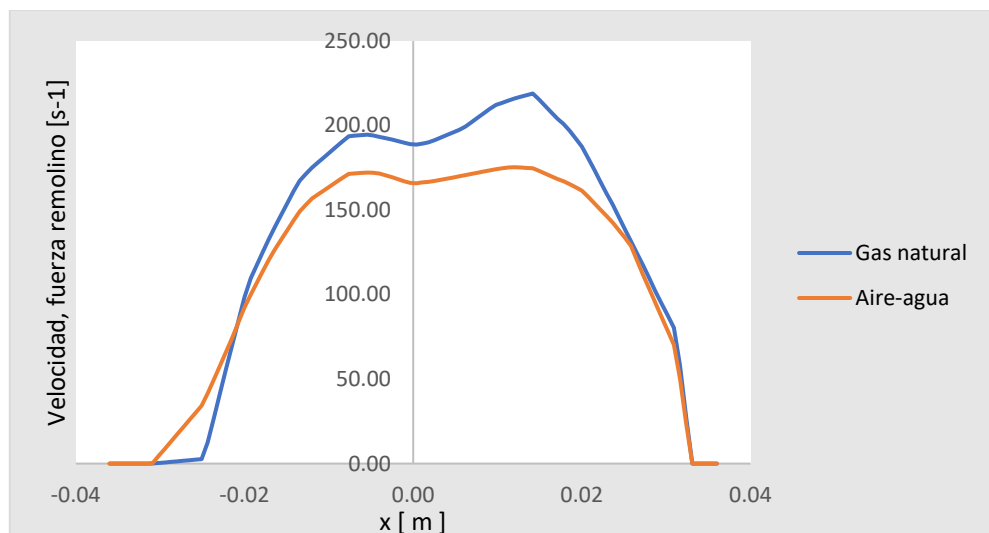


4.3 ANÁLISIS PARA LA MEZCLA DE GAS NATURAL

La geometría seleccionada fue la de 36° para hacer las simulaciones posteriores debido a que tiene las mejores características para una separación efectiva, tal y como se identificó anteriormente. El gas natural que se obtiene del campo Cusiana es la mezcla utilizada. Debido a que el separador estudiado está dimensionado para el flujo volumétrico de la mezcla aire-agua anterior, se asegura que la mezcla de gas natural ingrese al sistema a las mismas condiciones de flujo. Además, los modelos físicos utilizados son los mismos que para las simulaciones aire-agua debido a que no hay antecedentes bibliográficos de estudios experimentales o de simulaciones numéricas que permitan validar los resultados cuando se usa una mezcla de gas natural en el separador.

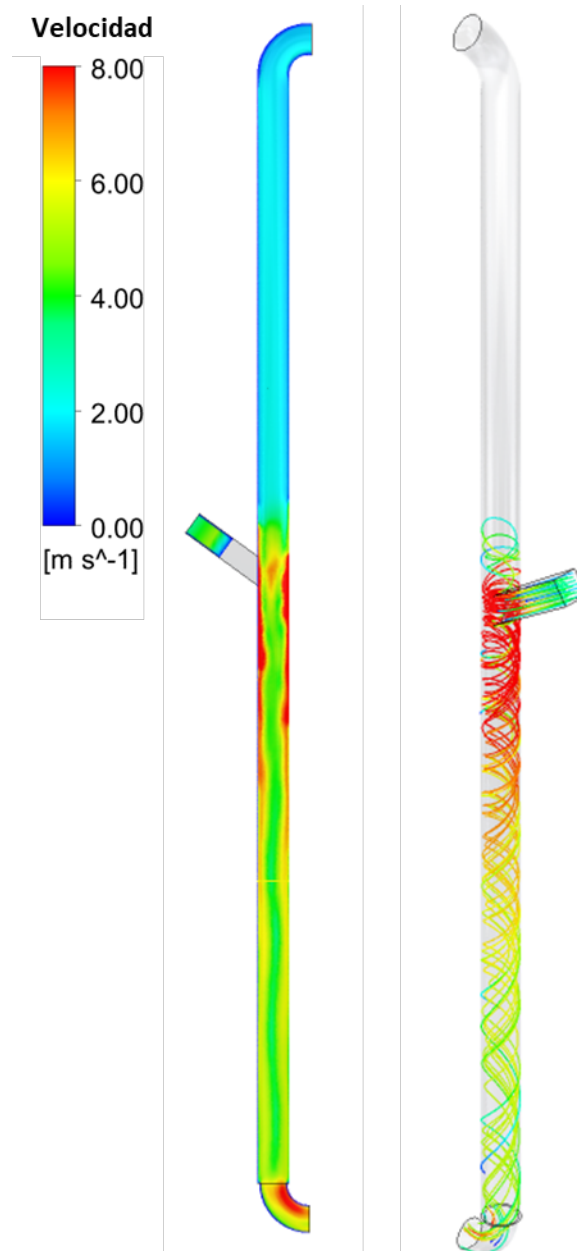
En la **Figura 32** se muestra la velocidad angular del vórtice para la mezcla de gas natural comparada con la de la mezcla aire-agua la cual varía en el centro del ciclón siendo hasta un 24% mayor para el gas natural debido a que el contenido de líquido en este es menor que en la mezcla aire-agua y puede hacer que la intensidad del vórtice sea aumente. Esto puede favorecer la separación de las fases en el gas natural.

Figura 32: Velocidad angular gas natural



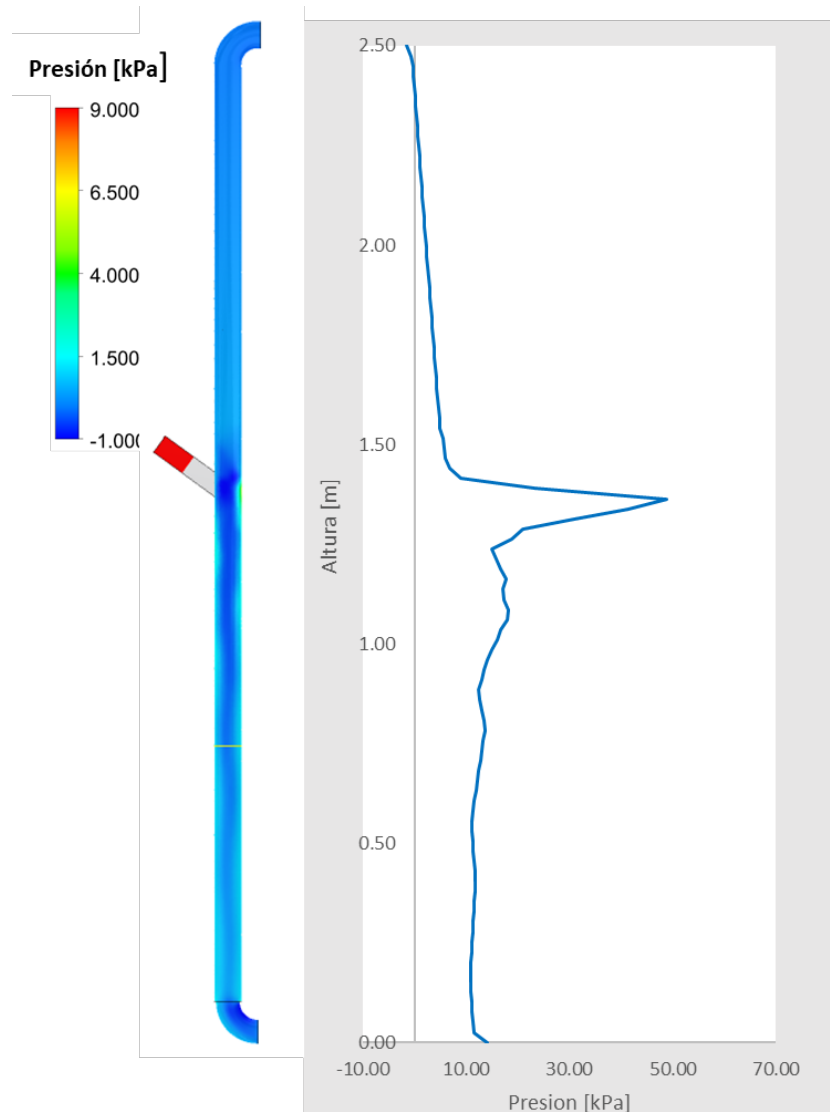
En la **Figura 33** se presentan los resultados de contornos de velocidad y líneas de flujo con los cuales se logra identificar claramente la formación del ciclón con características similares a las del caso anterior.

Figura 33: Contorno de velocidad y líneas de flujo del gas natural



La caída de presión para el separador de gas natural es mostrada en **Figura 34**, en ella se puede observar la zona de alta presión justo enfrente de la boquilla de entrada.

Figura 34: Presión a lo largo del separador del gas natural



Los contornos de fracción volumétrica para cada una de las especies químicas encontradas en la mezcla de gas natural se encuentran en la **Figura 35** y **Figura 36** para el pentano y hexano con el fin de mostrar en mayor detalle las paredes del separador. En ellos se puede observar que los componentes más pesados, están en la parte baja del ciclón y se localizan hacia las paredes por acción de la fuerza centrífuga. Esto asegura que el metano que sale por la parte superior tiene muy bajas cantidades de los compuestos más pesados como el pentano y el hexano, haciendo a este un proceso efectivo para separar las fases en el gas natural. Además, puede ser una alternativa para la

remoción de contaminantes como el dióxido de carbono. Los contornos se presentan a diferentes escalas debido a que la cantidad de cada uno de los componentes está en rangos diferentes.

Figura 35: Contornos de fracción volumétrica para el gas natural

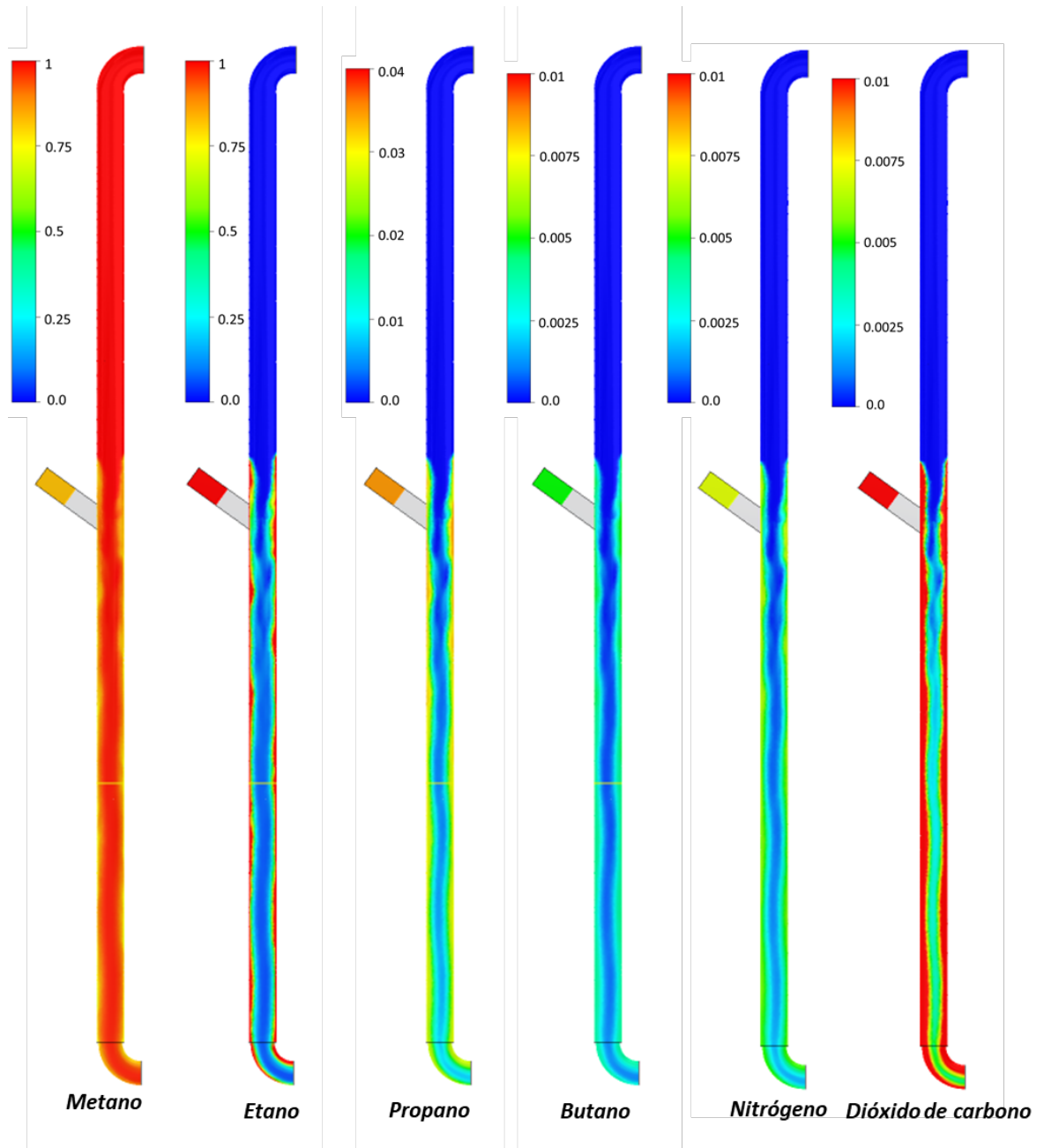
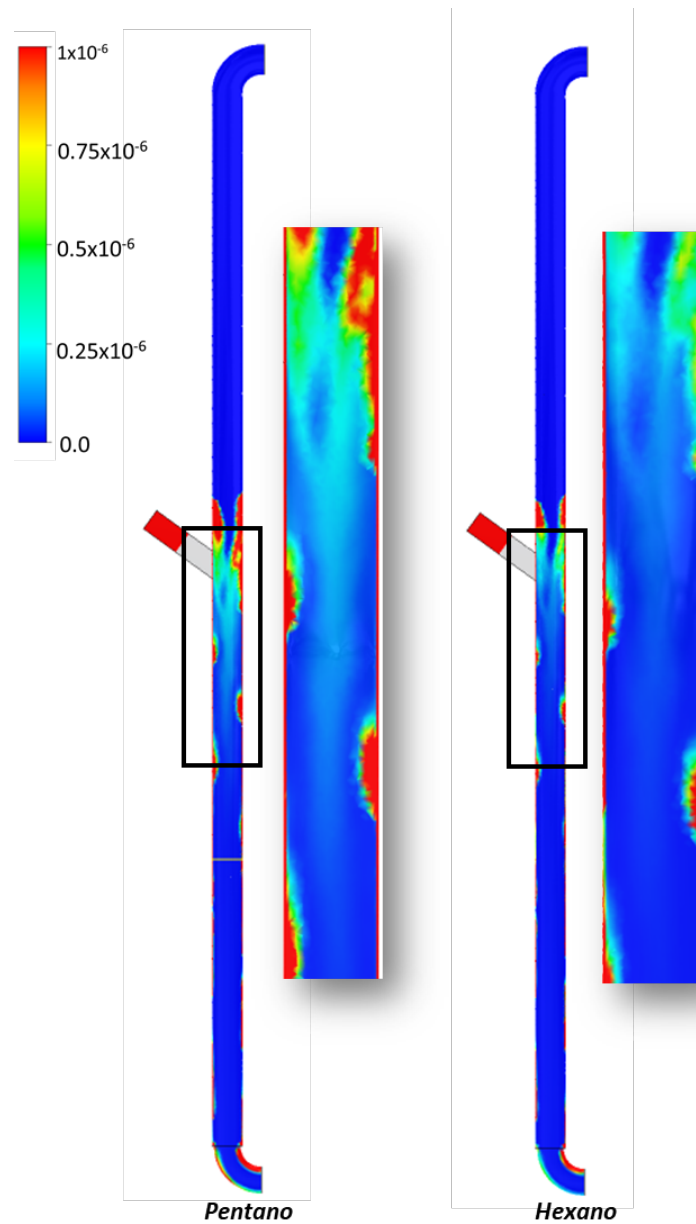


Figura 36: Contornos de fracción volumétrica de pentano y hexano



A fin de conocer la nueva composición del gas en las salidas superior e inferior del separador, se calcularon los flujos máxicos en la herramienta de *CFD-post* y se llevaron a flujo molar de cada componente para poder expresar la composición en porcentaje molar mostrada en la **Tabla 4**. Se puede observar que la corriente superior está compuesta en su totalidad por metano, lo cual

indica que un 87% del metano que entra, sale puro. Los demás compuestos y el resto del metano salen por la parte inferior del equipo. Así, tal y como se mostró en los contornos de fracción volumétrica de las fases, luego de los compuestos más pesados se van radialmente hacia las paredes del separador, estos se dirigen hacia la salida inferior. Por lo cual, se verifica la efectividad del proceso de separación centrífuga para la mezcla de gas natural.

Tabla 4: Composición final del gas natural

Compuesto	% Molar		
	Entrada	Salida superior	Salida inferior
Metano	82.19	100	37.75
Etano	10.43	0	35.81
Propano	3.59	0	12.42
Butano	1.02	0	1.86
Pentano	0.12	0	0.17
Hexano	0.02	0	0.07
Nitrógeno	0.65	0	1.48
Dióxido de carbono	1.97	0	10.44

5 CONCLUSIONES

Con base a los estudios experimentales de separadores ciclónicos hechos por HREIZ, Rainier *et al* (2014)³⁹, se validaron los resultados de las simulaciones de CFD. Mediante la comparación de perfiles de velocidad axial y tangencial en el ciclón se comprobó que los modelos matemáticos escogidos reproducen la fluido-dinámica en el separador ciclónico ya que los resultados tienen el mismo comportamiento a lo largo del radio del ciclón y tienen una desviación estándar de 0,26 m/s en promedio. Por lo cual, se utilizó el mismo modelo para realizar modificaciones en la geometría del separador a fin de determinar la mejor configuración de la boquilla de entrada y simular una mezcla de gas natural.

Las modificaciones hechas a la geometría fueron el cambio del ángulo de la boquilla de entrada de 27° a 36° y 45°. Luego de simular a las mismas condiciones una mezcla aire-agua, se estudiaron la velocidad, presión y fracción volumétrica para cada configuración a fin de seleccionar la que formara un ciclón con las mejores características para realizar la separación de fases. Con los contornos de velocidad, se reconoció la formación del ciclón a lo largo de la parte baja del separador y con los de presión se identificó que la zona con mayor presión en el separador esta justo enfrente de la boquilla de entrada debido al cambio de dirección del fluido entrante. Se puede apreciar que la fracción volumétrica de agua alcanza sus valores máximos en las paredes del separador, mientras que, en el centro están los valores más bajos. Esto se da debido a que la fuerza centrífuga causada por el vórtice, obliga a las gotas de líquido a dirigirse radialmente a las paredes del equipo, causando la separación de las fases.

³⁹ HREIZ, Rainier et al., Hydrodynamics and velocity measurements in gas–liquid swirling flows in cylindrical cyclones.

Según la comparación de la velocidad angular en el ciclón, la cual está relacionada con la magnitud de la fuerza centrífuga, mecanismo de separación de las fases, se concluyó que a menor ángulo de entrada mayor es la velocidad angular en el ciclón siendo hasta 66% mayor para la boquilla de 27°. Por lo cual esta podría generar una separación efectiva. Sin embargo, mediante los contornos de flujo másico de agua, se evidenció que para el ángulo de 27° el riesgo de LCO o salida de líquido por la corriente superior es mayor. Esta boquilla, además, puede hacer que la presión en la región de entrada sea hasta 1,6 y 3,5 veces mayor que la presentada en las boquillas de 36° y 45° respectivamente.

Teniendo en cuenta el análisis para cada una de las configuraciones de la boquilla en el separador, se seleccionó la de 36° para realizar las simulaciones posteriores. Se escogió la composición del gas natural del campo colombiano Cusiana. Debido a que no hay antecedentes bibliográficos de estudios experimentales o de simulaciones numéricas que permitan validar los resultados cuando se usa una mezcla de gas natural en el separador, los modelos físicos utilizados en la simulación fueron los mismos que para la mezcla aire agua. Las variables analizadas fueron las mismas que para la mezcla anterior, siendo la velocidad y la presión cercanas en los dos casos para la misma geometría debido a que esta tenía las mismas condiciones de flujo, sin embargo, la velocidad angular fue mayor para el gas natural debido al bajo contenido de líquido. **Los contornos de fracción volumétrica y la composición de salida del gas muestran que los compuestos más pesados como el pentano y el hexano se ubican en la parte inferior y en las paredes del separador y se dirigen a la salida inferior, mientras que un 87% del metano inicial sale puro por la parte superior, mostrando una separación efectiva de las fases por acción de la fuerza centrífuga.**

El uso de la simulación CFD permite conocer el comportamiento fluido-dinámico en el separador tipo GLCC, el cual presenta gran complejidad por ser un flujo multifásico y arremolinado. Estas aproximaciones computacionales

son útiles debido a que no es económicamente viable la construcción de prototipos ni su operación en diferentes condiciones a fin de encontrar las mejores características del equipo. Además, la utilización de CFD posibilita la aplicación del equipo a diferentes sustancias de forma segura tal y como se hizo en el presente trabajo con la mezcla de gas natural. Así, este trabajo presenta un estudio sin precedentes el cual permite conocer el comportamiento fluido-dinámico de una mezcla de gas natural real, siendo de gran utilidad para la industria OGP (*Oil, Gas and Petrochemical*) ya que este separador puede ser usado como una alternativa más económica y simple que los equipos convencionales para la separación de fases.

6 TRABAJOS FUTUROS

Considerar la utilización de otro modelo de turbulencia como el RSM o LES para las simulaciones a fin de obtener resultados más precisos para la validación.

Simular otras mezclas de gas natural para poder establecer rangos de operación de este tipo de separador.

Hacer el dimensionamiento del separador con los modelos mecánicos disponibles en la literatura para un flujo volumétrico de líquido y gas diferentes a los ya establecidos en la literatura con el fin de poder utilizar el equipo para un caso de producción de gas natural real y hacer la simulación respectiva a las condiciones de flujo requeridas.

Realizar estudios con CFD de separación de fases de mezclas de gas natural en equipos GLCC a condiciones de alta presión (por encima de 4 MPa), con el objetivo de presentar una alternativa de procesamiento compacta y económica a los ya conocidos separadores gravitacionales utilizados en la industria OGP (*Oil, Gas and Petrochemical*)

BIBLIOGRAFÍA

AMELL, Andres A, BEDOYA, Cesar A, y SUAREZ, Bladimir. «Efectos del cambio de composición química del gas natural sobre el comportamiento de turbina a gas: Una aproximación al caso colombiano», 2006.

ANSYS, Inc. «ANSYS Fluent Theory Guide 18.0», enero de 2017.

ARNOLD, Ken, y STEWART, Maurice. Surface Production Operations. 3.a ed. Vol. 1, 2008.

ARPANDI, I. A Mechanistic Model for Two-Phase Flow in Gas-Liquid Cylindrical Cyclone Separators. University of Tulsa, 1995.

ARPANDI, I, JOSHI, A. R, SHOHAM, Ovadia, SCHIRAZI, Siamack, y KOUBA, Gene E. «Hydrodynamics of Two-Phase Flow in Gas-Liquid Cylindrical Cyclone Separators». SPE Journal 1, n.o 04 (1 de diciembre de 1996): 427-36. <https://doi.org/10.2118/30683-PA>.

CHUNG, T. J. Computational fluid dynamics. Cambridge university press, 2010.

Comisión de Regulación de Energía y Gas (CREG). «Resolución No. 071: Reglamento Unico de Transporte de Gas Natural- (RUT)», 1999. <http://www.creg.gov.co/>.

Ecopetrol. «Calidad del gas natural», s. f. <https://www.ecopetrol.com.co/wps/portal/es/ecopetrol-web/productos-y-servicios/productos/gas-natural/informacion-comercial/Calidad%20del%20Gas/Calidad+del+Gas>.

Elsayed, Khairy, y Chris Lacor. «The effect of cyclone inlet dimensions on the flow pattern and performance». Applied Mathematical Modelling 35, n.o 4 (abril de 2011): 1952-68. <https://doi.org/10.1016/j.apm.2010.11.007>.

GHASEMI, Amirhosein, SHAMS, Mehrzad, y HEYHAT, Mohammad Mahdi. «A Numerical Scheme for Optimizing Gas Liquid Cylindrical Cyclone Separator». Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part E: Journal of Process Mechanical Engineering, 24 de abril de 2016, 0954408916644002. <https://doi.org/10.1177/0954408916644002>.

GOMEZ, L. E, MOHAN, R. S., SHOHAM, Ovadia, y KOUBA, Gene E. «Enhanced Mechanistic Model and Field-Application Design of Gas/Liquid Cylindrical Cyclone Separators». SPE Journal 5, n.o 02 (1 de junio de 2000): 190-98. <https://doi.org/10.2118/62487-PA>.

GOMEZ, Luis E., RAM S. Mohan, OVADIA Shoham, JACK D. Marrelli, y GENE E. Kouba. «State-of-the-Art Simulator for Field Applications of Gas-Liquid Cylindrical Cyclone Separators». Society of Petroleum Engineers, 1999. <https://doi.org/10.2118/56581-MS>.

HOFFMANN, A. C., y STEIN, L. E. Gas Cyclones and Swirl Tubes. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2007. <https://doi.org/10.1007/978-3-540-74696-6>.

HREIZ, Rainier, GENTRIC, Caroline, MIDOUX, Noël, LAINÉ, Richard, y FÜNFSCHILLING, Denis. «Hydrodynamics and velocity measurements in gas-liquid swirling flows in cylindrical cyclones». Chemical Engineering Research and Design 92, n.o 11 (1 de noviembre de 2014): 2231-46. <https://doi.org/10.1016/j.cherd.2014.02.029>.

HREIZ, Rainier, LAINÉ, Richard, WU, Jing, LEMAITRE, Cécile, GENTRIC, Caroline, y FÜNFSCHILLING, Denis. «On the effect of the nozzle design on the performances of gas-liquid cylindrical cyclone separators». International Journal of Multiphase Flow 58 (enero de 2014): 15-26. <https://doi.org/10.1016/j.ijmultiphaseflow.2013.08.006>.

KOUBA, Gene E., SHOHAM, Ovadia, y SCHIRAZI, Siamack. «Design and Performance of Gas Liquid Cylindrical Cyclone Separators», 1995. <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.463.5563&rep=rep1&type=pdf>.

Ovadia Shoham, y Ram Mohan. «Tulsa University Separation Technology Projects (TUSP)», s. f. <http://www.tustp.org/>.

PRIETO, Natalia. «Simulação da combustão de coque em regeneradores FCC usando fluidodinâmica computacional.», 2011.

SHOHAM, Ovadia, y KOUBA, Gene E. «State of the Art of Gas/Liquid Cylindrical-Cyclone Compact-Separator Technology». Journal of Petroleum Technology 50, n.o 07 (1 de julio de 1998): 58-65. <https://doi.org/10.2118/39600-JPT>.

SILVA, Germán González; PRIETO, Natalia; MERCADO, Iván. «Large Eddy Simulation (LES) Aplicado a un lecho fluidizado gas-sólido. Parte I: Reactor a escala de laboratorio.» Revista UIS Ingenierías, 2018.

WANG, Shoubo, GOMEZ, L. E, MOHAN, R. S., SHOHAM, Ovadia, y KOUBA, Gene E. «Gas-Liquid Cylindrical Cyclone (GLCC©) Compact Separators For Wet Gas Applications». Journal of Energy Resources Technology 125, n.o 1 (14 de marzo de 2003): 43-50. <https://doi.org/10.1115/1.1513180>.

YANG, Yan, y LI, Zi Li. «Double Inlet Cyclone Separators for Natural Gas Dehydration». Applied Mechanics and Materials, 2011.
<https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.44-47.1002>.

ANEXOS

ANEXO A- Flujo másico de agua en el ciclón para un flujo de agua 3 veces mayor

Figura A1. Flujo másico de agua

