

**ESTUDIO DEL EFECTO DEL TAMAÑO DE GOTA Y VELOCIDAD DE ENTRADA
SOBRE LA EFICIENCIA DE SEPARACIÓN DEL GAS NATURAL EN UN
SEPARADOR CICLÓNICO USANDO DINÁMICA DE FLUIDOS
COMPUTACIONAL**

**JAIR ORLANDO AVILA GÓMEZ
LILIANA FORERO NOGUERA**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISCOQUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA DE PETRÓLEOS
BUCARAMANGA**

2019

**ESTUDIO DEL EFECTO DEL TAMAÑO DE GOTA Y VELOCIDAD DE ENTRADA
SOBRE LA EFICIENCIA DE SEPARACIÓN DEL GAS NATURAL EN UN
SEPARADOR CICLÓNICO USANDO DINÁMICA DE FLUIDOS
COMPUTACIONAL**

**JAIR ORLANDO AVILA GÓMEZ
LILIANA FORERO NOGUERA**

**Trabajo de grado en la modalidad de investigación para optar al título de
Ingeniero de Petróleos**

Director

**GERMÁN GONZÁLEZ SILVA
Ph.D. en ingeniería Química**

Co-director

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

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISCOQUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA DE PETRÓLEOS
BUCARAMANGA**

2019

*Dedicamos este trabajo a Dios y a los
estudiantes de la Escuela de Ingeniería de
Petróleos*

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos a nuestra familia por el apoyo y las palabras de aliento dadas en los momentos difíciles, a nuestros amigos que con pequeñas acciones nos animaban a continuar y a dar solución a los problemas presentados en nuestro camino como estudiantes, y a la ingeniera Natalia Prieto y el ingeniero German González por guiarnos, corregirnos y brindarnos su ayuda en el desarrollo de este trabajo.

A todos, mil gracias.

TABLA DE CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN.....	19
1. OBJETIVOS	21
1.1. OBJETIVO GENERAL	21
1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	21
2. REVISION BIBLIOGRAFICA	22
2.1. DINÁMICA DE FLUIDOS COMPUTACIONAL (CFD).....	22
2.2. CFD EN LA INDUSTRIA DEL PETROLEO	24
2.3. SEPARADORES GAS-LIQUIDOS CICLONICOS CILINDRICOS	26
2.3.1. Diseño de los Separadores GLCC	27
2.3.2. Separación de gotas en GLCC	31
2.3.3. Distribución de tamaño de gota.....	32
2.3.4. Estudios GLCC	34
3. MODELAMIENTO MATEMATICO	36
3.1. ECUACION DE CONTINUIDAD	36
3.2. ECUACION DE CANTIDAD DE MOVIMIENTO	38
3.3. PLANTEAMIENTO EN CFD	40
3.3.1. Modelo de flujo multifásico.....	41
3.3.2. Modelo de fase discreta	43
3.3.3. Modelo de turbulencia.....	44
4. MODELO NUMÉRICO	47
5. METODOLOGÍA	49
5.1. IDENTIFICACIÓN DEL PROBLEMA	50
5.2. PRE-PROCESAMIENTO	50
5.2.1. Geometría.....	50
5.2.2. Malla	52
5.2.3. Modelos físicos.	53
5.2.4. Propiedades del Fluido	53
5.2.5. Condiciones de Frontera.....	54
5.3. SOLVER.....	54

5.4. POST-PROCESAMIENTO.....	55
6. ANALISIS DE RESULTADOS.....	56
6.1. TEST DE INDEPENDENCIA DE MALLA.....	56
6.2. ANALISIS DE FLUJO DE GAS Y TRAYECTORIA DE GOTAS EN EL GLCC.....	58
6.3. ANÁLISIS DE LA EFICIENCIA DE SEPARACIÓN EN FUNCIÓN DEL TAMAÑO DE GOTA Y VELOCIDAD DE ENTRADA.....	60
6.4. ANÁLISIS DE LA EFICIENCIA DE SEPARACIÓN APLICANDO UNA DISTRIBUCIÓN DE GOTA INCLUYENDO FENÓMENOS DE RUPTURA Y COALESCENCIA.....	63
7. CONCLUSIONES	68
8. TRABAJOS FUTUROS.....	71
BIBLIOGRAFIA.....	72

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Gradientes de esfuerzo observados en la arteria coronaria izquierda. ...	23
Figura 2. Líneas de corriente de velocidad para la cavidad.	24
Figura 3. Efectos del cambio del diámetro principal del ciclón en LCO y GCU.	28
Figura 4. Efectos de cambiar la sección transversal de entrada en LCO y GCU. ...	29
Figura 5. Efectos del cambio del ángulo de entrada en LCO y GCU.	30
Figura 6. Gota en flujo turbulento.	32
Figura 7. Distribución de número y densidad de partículas para una muestra.	33
Figura 8. Distribución de número y densidad de partícula acumulativas para una muestra.	34
Figura 9. Elemento de volumen fijo $\Delta x \Delta y \Delta z$ a través del que circula un fluido. Las flechas indican la densidad de flujo de materia de entrada y salida en el volumen en las caras sombreadas localizadas en x y $x + \Delta x$	37
Figura 10. Elemento de volumen fijo $\Delta x \Delta y \Delta z$, con seis flechas que indican la densidad de flujo de cantidad de movimiento en la dirección x a través de las superficies por todos los mecanismos. Las caras sombreadas localizadas en x y $x + \Delta x$	38
Figura 11. Discretización del reactor de tanque agitado en volúmenes de control.	48
Figura 12. Metodología.	49
Figura 13. Dimensiones del separador GLCC.	51
Figura 14. Geometría.	52
Figura 15. Malla.	52
Figura 16. Diagrama de fase Presión-Temperatura.	53
Figura 17. Test de independencia de malla.	57
Figura 18. Posiciones radiales.	58
Figura 19. Distribución de la Velocidad Angular.	59
Figura 20. Distribución de la Velocidad Tangencial.	60

Figura 21. Perfil de Vórtices.....	62
Figura 22. Contornos de fracción másica de la fase líquida.....	63
Figura 23. Distribución de tamaño de gota para la entrada del fluido	64
Figura 24. Seguimiento de partícula con contorno de diámetro.....	65
Figura 25. Distribución de tamaño de gota en la entrada y las salidas	66
Figura 26. Medidas de eficiencias con coalescencia y ruptura	67

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Aplicaciones de CFD en la industria Oil & Gas	26
Tabla 2. Estado del arte	34
Tabla 3. Propiedades del gas sintético	54
Tabla 4. Ajuste numérico para la simulación	54
Tabla 5. Especificaciones del computador	55
Tabla 6. Número de Elementos y nodos en las diferentes mallas	57
Tabla 7. Resultados de las simulaciones	61

LISTA DE SIMBOLOS

Símbolo	Nombre	Unidad
$\partial\rho/\partial t$	Velocidad de incremento de materia	
C_d	Coeficiente de arrastre	
d	Diámetro de gotas	μm
\vec{F}	Fuerzas de cuerpos externos	
g	Gravedad	m/s^2
m_{sg}	Masa de la fase líquida en la salida	Kg
m_{total}	Masa total de líquido en la entrada	Kg
n	Eficiencia de separación	%
ε	Disipación de la energía cinética turbulenta	
∇	Operador diferencial vectorial	
ρ	Densidad	Kg/m^3
ρ_m	Densidad de la mezcla	Kg/m^3
t	Tiempo	S
p	Presión	Pa

k	Energía cinética turbulenta	
α	Fracción volumétrica	
v_m	Velocidad promedio	m/s
v_{dr}	Cambio de la velocidad	m/s
μ	Viscosidad cinemática	Pa*s
μ_m	Viscosidad de la mezcla	
μ_t	Viscosidad turbulenta	
$G_k, G_b, Y_m, S_k, C_{1\varepsilon}, C_{3\varepsilon}, C_{2\varepsilon}, C_\mu$	Constantes del modelo estándar k- ε	
$\sigma_k, \sigma_\varepsilon$	Números de Prandtl	
\bar{d}	Diámetro medio	μm
Y	Fracción acumulada de gotas	
Γ	Coefficiente de propagación	

LISTA DE ABREVIATURAS

ABREVIATURA	NOMBRE
CFD	Computational Fluid Dynamics
DPM	Discrete Phase Model
GCU	Gas Carry-Under
GLCC	Gas Liquid Cylindrical Cyclone
LCO	Liquid Carry-Over
RANS	Reynolds Averaged Navier-Stokes
RNG	Renormalization - Group
RSM	Reynolds Stress Models
SST	Shear Stress Transport

RESUMEN

TITULO: ESTUDIO DEL EFECTO DEL TAMAÑO DE GOTA Y VELOCIDAD DE ENTRADA SOBRE LA EFICIENCIA DE SEPARACIÓN DEL GAS NATURAL EN UN SEPARADOR CICLÓNICO USANDO DINÁMICA DE FLUIDOS COMPUTACIONAL *

AUTORES: JAIR ORLANDO AVILA GÓMEZ, LILIANA FORERO NOGUERA**

PALABRAS CLAVES: Separador gas-liquido ciclón cilíndrico (GLCC), dinámica de fluidos computacional (CFD), simulación numérica, eficiencia de separación, coalescencia, ruptura.

DESCRIPCIÓN:

Entre las facilidades de superficie se encuentran los equipos de separación gas-liquido, en donde los separadores gravitacionales son los más usados en la industria, pero estos son pesados, voluminosos y con altos costos de mantenimiento. Con el fin de disminuir costos operacionales, se ha estudiado la posibilidad de implementar separadores gas-liquido tipo ciclón cilíndricos (GLCC), los cuales son de una geometría simple, compactos y de bajo costo de mantenimiento debido a la carencia de partes móviles. En este trabajo se realiza un análisis de la eficiencia de separación de un separador tipo ciclón cilíndrico utilizando la dinámica de fluidos computacional (CFD) en el software de simulación ANSYS. El modelo de turbulencia usado fue el modelo $k-\epsilon$ *realizable* y para el análisis de tamaño de gota, se hizo un seguimiento Lagrangiano usando el modelo DPM (*Discrete Phase Model*). Se realizó una simulación numérica donde se estudió la trayectoria dinámica y el rendimiento de separación de las gotas de aceite en función de la velocidad y el tamaño de gota, se analizó la eficiencia incluyendo fenómenos de ruptura y coalescencia en las gotas. Los resultados mostraron que la ruptura y coalescencia de las gotas de aceite están presentes en el proceso de separación, lo que influye claramente en la eficiencia de la separación, también indicaron que la velocidad de entrada jugó un papel importante en la influencia de estos fenómenos y por lo tanto en la eficiencia, ya que determina la posibilidad y el grado de ruptura y coalescencia de las gotas.

* Trabajo de grado

** Facultad de ingenierías Físico-Químicas. Escuela de ingeniería de petróleos. Director: German Gómez.Ph.D

ABSTRACT

TITLE: STUDY OF THE EFFECT OF THE DROP SIZE AND ENTRY SPEED ON THE EFFICIENCY OF SEPARATION OF NATURAL GAS IN A CYCLONIC SEPARATOR USING DYNAMICS OF COMPUTATIONAL FLUIDS*

AUTHORES: JAIR ORLANDO AVILA GÓMEZ, LILIANA FORERO NOGUERA**

KEYWORDS: Cylindrical cyclonic gas-liquid separator (GLCC), computational fluid dynamics (CFD), numerical simulation, separation efficiency, coalescence, rupture

DESCRIPTION:

Among the surface facilities are gas-liquid separation equipment, where gravitational separators are the most used in the industry, but these are heavy, bulky and with high maintenance costs. In order to reduce operational costs, the possibility of implementing cylindrical cyclone gas-liquid separators (GLCC) has been studied, which are a simple, compact geometry and low maintenance cost due to the lack of moving parts. In this work an analysis of the separation efficiency of a cylindrical cyclone separator is performed using computational fluid dynamics (CFD) in the ANSYS simulation software. The turbulence model used was the K- ϵ Realizable model and for the drop size analysis, Lagrangian follow-up was done using the DPM model (discrete phase model). A numerical simulation was performed where the dynamic trajectory and the separation performance of the oil droplets were studied in function of the velocity and the size of the droplet, the efficiency of the phenomena of rupture and coalescence in the droplets was analyzed. The results indicate that the rupture and coalescence of the oil droplets are present in the separation process, which influences the efficiency of the separation, it also indicates the entry speed played an important role in the influence of these phenomena and therefore in efficiency, which determines the possibility and the degree of rupture and coalescence of the drops

* Bachelor Thesis

** Facultad de ingenierías Físico-Químicas. Escuela de ingeniería de petróleo. Director: German Gómez.Ph.D

INTRODUCCIÓN

En la industria del *Oil&Gas* para procesar las mezclas gas-líquido producidas a partir de pozos de petróleo/gas se utilizan separadores convencionales de tipo gravitacional, estos equipos son voluminosos, pesados y costosos tanto en capital como en operación. Esta tecnología después de varias décadas de uso, ha alcanzado un grado avanzado de madurez, es decir, no han cambiado sustancialmente en los últimos años, y las mejoras realizadas se refieren principalmente a los elementos internos de estos equipos. ¹

El aumento de exploraciones en alta mar y la necesidad de reducir costos en los equipos ha motivado a la industria petrolera a explorar el desarrollo y la aplicación de tecnologías alternativas como los sistemas de separación compactos o en línea, un ejemplo de estos, es el separador ciclón cilindro de gas y líquido (GLCC).

El GLCC es un separador compacto, de bajo peso y costo. Se caracteriza por no tener partes móviles ni dispositivos internos. Consiste en un tubo vertical con una entrada tangencial inclinada hacia abajo ubicada aproximadamente a media altura del cuerpo del separador, y dos salidas respectivamente en la parte superior e inferior. La entrada tangencial del GLCC proporciona un movimiento giratorio a la mezcla entrante y las dos fases se separan debido a la fuerza centrífuga. El líquido es forzado radialmente hacia la pared del cilindro y se recoge de la salida inferior, mientras que el gas es forzado radialmente hacia el centro del ciclón y sale por la parte superior del separador.²

¹ Gomez, L. E., Mohan, R. S., Shoham, O., The, S. P. E., Texaco, J. D. M., Kouba, G. E., Technology, P. (1999). State-of-the-Art Simulator for Field Applications of Gas-Liquid Cylindrical Cyclone Separators. *Spe* 56581.

² Hreiz, R., Lainé, R., Wu, J., Lemaitre, C., Gentric, C., & Fünfschilling, D. (2013). On the effect of the nozzle design on the performances of gas-liquid cylindrical cyclone separators. *International Journal of Multiphase Flow*, 58, 15–26. <https://doi.org/10.1016/j.ijmultiphaseflow.2013.08.006>

La amplia variedad de aplicaciones de GLCC puede tener diferentes requisitos de rendimiento, que varían desde una separación parcial hasta una separación de fase completa. Las aplicaciones potenciales incluyen: control de RGL (relación gas-líquido) para medidores de flujo y bombas de múltiples fases, medición de prueba de pozo, medición de calidad de vapor, lavado de gases de combustión, separación de superficie primaria o submarina y separación previa corriente arriba de los receptores de baches o separadores primarios.³

La mayoría de los estudios relacionados a la eficiencia de separación en GLCC se ocupa de su configuración independiente y carece de suficiente información para el diseño y rendimiento óptimo de un GLCC.⁴ En esta investigación se realiza un estudio de la eficiencia en un separador gas-líquido tipo ciclón en función de la velocidad de entrada y una distribución del tamaño de gota de un gas natural mediante dinámica de fluido computacional (CFD), con el fin de generar un mayor entendimiento del impacto de los fenómenos de ruptura y coalescencia en la eficiencia de separación.

³ Ghasemi, A., Shams, M., & Heyhat, M. M. (2016). A numerical scheme for optimizing gas liquid cylindrical cyclone separator. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part E: Journal of Process Mechanical Engineering*, 231(4), 836–848. <https://doi.org/10.1177/0954408916644002>

⁴ Wang, L., Feng, J., Gao, X., & Peng, X. (2017). Investigation on the oil - gas separation efficiency considering oil droplets breakup and collision in a swirling flow. *Chemical Engineering Research and Design*, 117, 394–400. <https://doi.org/10.1016/j.cherd.2016.10.033>

1. OBJETIVOS

1.1. OBJETIVO GENERAL

Estudiar el efecto del tamaño de gota y velocidad de entrada sobre la eficiencia de separación del gas natural en un separador ciclónico usando dinámica de fluidos computacional.

1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Definir características y comportamiento fluido dinámico global de una separación gas-líquido en un separador ciclónico.
- Evaluar el efecto del tamaño de gota y velocidad de entrada en la eficiencia de separación gas-líquido en un GLCC usando dinámica de fluidos computacional.
- Utilizar una distribución del tamaño de gota para evaluar la eficiencia de separación cuando se incluyen fenómenos como ruptura y coalescencia.

2. REVISION BIBLIOGRAFICA

En este capítulo se presentarán diversos trabajos desarrollados usando la dinámica de fluidos computacional en diferentes áreas. También se dará a conocer unos ejemplos del uso de esta herramienta en la industria del petróleo. Posteriormente, se describirá brevemente los métodos de separación gas-liquido utilizados actualmente en la industria petrolera, haciendo énfasis en la separación centrifuga. Finalmente, se dará a conocer trabajos desarrollados acerca del funcionamiento de los separadores GLCC, estudios experimentales y estudios hechos con CFD.

2.1. DINÁMICA DE FLUIDOS COMPUTACIONAL (CFD)

La dinámica de fluidos computacional (CFD) se define como la técnica informática que busca la simulación del movimiento de los fluidos. Las principales ventajas de la técnica de CFD sobre otro tipo de estudios de mecánica de fluidos son la reducción sustancial de tiempo y costos en los experimentos, la posibilidad de analizar sistemas o condiciones muy difíciles de simular experimentalmente y un nivel de detalle prácticamente ilimitado.

Esta herramienta abarca múltiples campos de acción; en la agroindustria ayuda al acondicionamiento térmico de las instalaciones para pollos de engorde.⁵ En acuicultura, la CFD es utilizada para visualizar y evaluar el comportamiento hidrodinámico de tanques de cultivo de peces, tomando en cuenta las condiciones de flujo para el sano desarrollo de los peces.⁶ En la medicina se ha usado para la comparación de catéteres de hemodiálisis simétricos.⁷ En el 2014, Sun & Xu⁸,

⁵ Osorio, J. A., Aredes, M., Zapata, O. L., Damasceno, F. A., & Ciro, H. J. (2012). Una Revisión Acerca De La Dinamica De Fluidos Computacionales (Cfd) En Instalaciones Avícolas. *Dyna*, 175, 142–149.

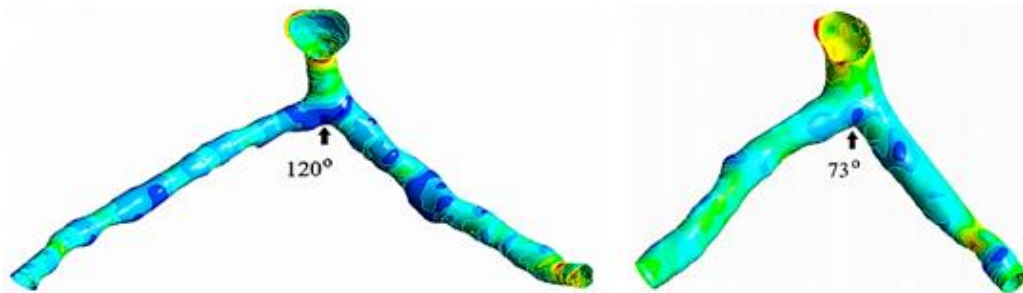
⁶ Boris, M. (2015). Aplicación de cfd-ansys-fluent en el estudio hidrodinámico de tanques de recirculación empleados en acuicultura, 145.

⁷ Clark, T. W. I., Isu, G., Gallo, D., Verdonck, P., & Morbiducci, U. (2015). Comparison of symmetric hemodialysis catheters using computational fluid dynamics. *Journal of Vascular and Interventional Radiology*, 26(2), 252-259.e2. <https://doi.org/10.1016/j.jvir.2014.11.004>

⁸ Sun, Z., & Xu, L. (2014). Computational fluid dynamics in coronary artery disease. *Computerized Medical Imaging and Graphics*, 38(8), 651–663. <https://doi.org/10.1016/j.compmedimag.2014.09.002>

presentaron una revisión basada en la evidencia del CFD en la biomecánica de las placas ateroscleróticas y en la detección de placas coronarias de alto riesgo y la progresión de la placa con el objetivo de identificar a los pacientes de alto riesgo para alcanzar el objetivo de la reducción de la mortalidad cardíaca. En la Figura 1, se puede observar los gradientes de esfuerzo de corte con diferentes ángulos de los modelos realistas de arteria coronaria izquierda generados a partir de la angiografía por tomografía computarizada coronaria en la fase sistólica máxima de 0,4 s. Las flechas indican las distribuciones de gradiente de tensión de corte de la pared.

Figura 1. Gradientes de esfuerzo observados en la arteria coronaria izquierda.



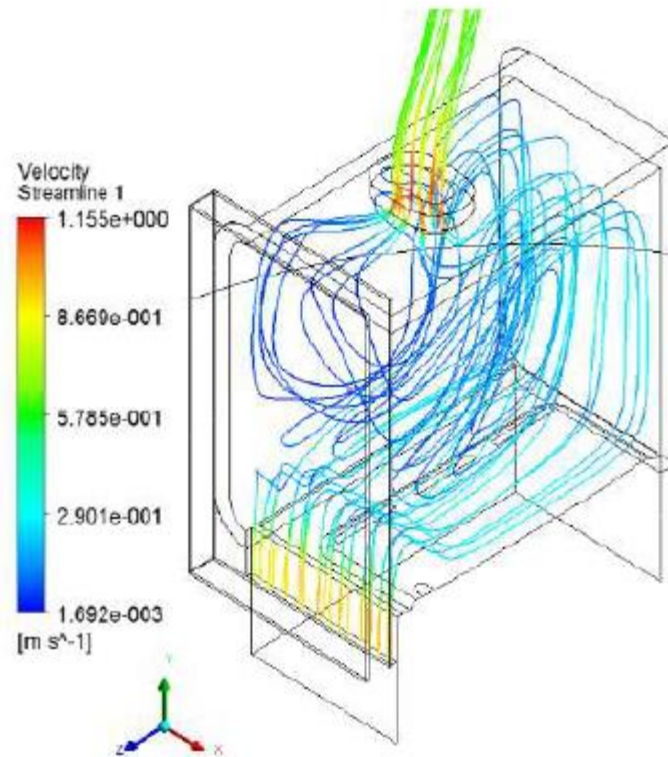
Fuente: Sun, Z., & Xu, L. (2014). Computational fluid dynamics in coronary artery disease. *Computerized Medical Imaging and Graphics*, 38(8), 651–663

La dinámica de fluidos computacional también se ha usado para el estudio de la acción del oleaje sobre las estructuras costeras⁹ y para obtener perfiles de temperaturas asociados a la transferencia de calor por convección y radiación, así como el calentamiento en los vidrios de la puerta en un horno a gas natural¹⁰. En la Figura 2 se observa el arrastre del aire desde el exterior de la cavidad hacia el interior del horno.

⁹ Higuera, P. (2015). Application of Computational Fluid Dynamics to Wave Action on Structures. Phd. Thesis, 60. Retrieved from <http://www.tesisenred.net/handle/10803/288368>

¹⁰ Beatove, S. L. (2010). Métodos Numéricos y sus Aplicaciones en Diferentes Areas. In IX CONGRESO COLOMBIANO DE METODOS NUMERICOS: Simulación en Ciencias y Aplicaciones.

Figura 2. Líneas de corriente de velocidad para la cavidad.



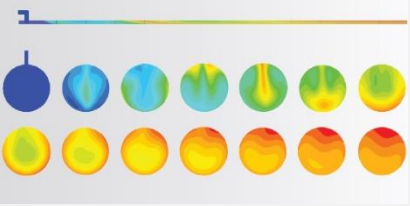


Fuente: Beatove, S. L. (2010). Métodos Numéricos y sus Aplicaciones en Diferentes Areas. In IX CONGRESO COLOMBIANO DE METODOS NUMERICOS: Simulación en Ciencias y Aplicaciones.

2.2. CFD EN LA INDUSTRIA DEL PETROLEO

La dinámica de fluidos computacional (CFD) es una herramienta que presenta un marcado crecimiento en la Industria del Petróleo y Gas (O&G), dado al enorme potencial de aplicación en los fenómenos de transporte que están presentes en los procesos. Actualmente la posibilidad de utilizar CFD para estudiar un equipo o parte de un proceso, permite introducir a la fluido dinámica como una nueva variable de ajuste, la cual es posible de ser optimizada para obtener mayores beneficios económicos, diagnosticar y resolver fallas de procesos o incorporar mejoras en materia de seguridad operativa.

En la industria de hidrocarburos el manejo y procesamiento de líquidos, gases y en algunos casos sólidos, involucra fenómenos de transporte complejos en los que se involucra reacciones químicas, transferencia de masa y de calor, flujos multifásicos entre otros, es por ello que la inclusión de la herramienta de simulación mediante CFD ha permitido analizar equipos como intercambiadores de calor, separadores gas-liquido, unidades de cracking catalítico, reactores, chimeneas, tanques de almacenamientos etc. En la Tabla 1 se presentan algunos casos de aplicación del CFD en la industria petrolera.

Tabla 1. Aplicaciones de CFD en la industria Oil & Gas

Aplicación	Descripción	Imagen
Flujo multifásico en tuberías	La simulación revela contornos de fracciones de masa de fase vapor en varias secciones transversales aguas abajo. Las fracciones en masa de hidrocarburos vaporizados aumentan con la distancia corriente abajo del punto de mezcla.	
Predicción de falla del equipo debido a la erosión	Se puede predecir la erosión debida al flujo de partículas, así como la causada por el impacto y la rodadura en las superficies. La imagen muestra contornos de la tasa de erosión en una válvula de estrangulación.	
Optimización de la producción de hidrocarburos y costos de desarrollo unitarios en reservorios de petróleo y gas no convencionales	Los ingenieros pueden combinar la mecánica estructural y el análisis de flujo de fluidos para rocas unidas con sensibilidad y análisis paramétrico para optimizar el fracking hidráulico.	

Cambio de fase termodinámica en tuberías e instalaciones de petróleo y gas

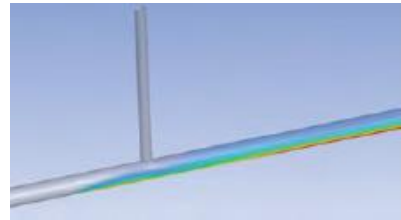
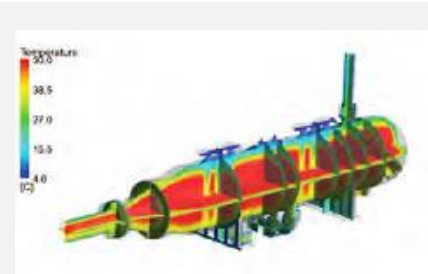
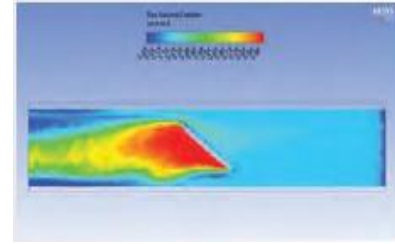
Análisis de enfriamiento de separadores submarinos

Caracterización de hidratos de gas

Se utiliza el análisis 3-D de dinámica de fluidos computacional y los cálculos de PVT para tener en cuenta la mecánica de fluidos detallada y las propiedades de flujo relacionadas para diferentes temperaturas y presiones de fluidos.

El diseño de equipos submarinos para operar de manera efectiva y confiable durante largos períodos de tiempo es un desafío. Parte de la complejidad se deriva de la comprensión de los flujos multifase y el enfriamiento de cada dispositivo durante una interrupción o pausa en la producción.

Se puede realizar simulaciones de formación de hidratos en equipos y tuberías de petróleo y gas en condiciones determinadas de presión, temperatura y composición del gas.



. Tomado de ANSYS Advantage Staff, 2015

2.3. SEPARADORES GAS-LIQUIDOS CICLONICOS CILINDRICOS

El GLCC es un separador simple, compacto y de bajo peso y costo que ha sido diseñado con el propósito de reemplazar o complementar los separadores convencionales. Consiste en un tubo vertical con una entrada tangencial inclinada, usualmente colocada en la mitad del cilindro vertical. Además, cuenta con dos salidas en la parte inferior y superior para el líquido y el gas respectivamente.

El flujo rotacional se genera al impartir una componente tangencial a un flujo axial el cual resulta en un remolino de las líneas de corriente, de tal manera que debajo de la entrada algunas burbujas quedan atrapadas en el líquido y son empujadas

radialmente hacia el centro del cilindro mientras en la parte superior las gotas de líquido son centrifugadas hacia las paredes del mismo formando una masa que no puede ser arrastrada por el gas. Este tipo de flujo es usado en separadores tipo ciclón para la mejorar la transferencia de calor, evitar bloqueos y minimizar el desgaste en las tuberías que utilizan el transporte hidráulico o neumático¹¹. En este tipo de ciclones la geometría juega un papel importante y debe ser estudiado de manera cuidadosa, para no afectar de manera sustancial el flujo que se desea y volver más complejo el estudio de este.

El GLCC ha sido estudiado principalmente en la Universidad de Tulsa (OK, EE. UU) en conjunto con Chevron. Se han hecho estudios de todo tipo, desde estudios experimentales y teóricos hasta simulaciones en CFD. Estos estudios se hacen principalmente para entender los fenómenos físicos que ocurren en el interior del ciclón, así como los flujos que se producen. Para esto se han utilizado diferentes fluidos y modelos de turbulencia, así como montajes experimentales.

2.3.1. Diseño de los Separadores GLCC: En los separadores GLCC, el rendimiento se ve afectado por la geometría y dimensiones del mismo, puesto que los fluidos estarán en contacto directo con la superficie del equipo. Entre los aspectos de diseño más importantes de un separador GLCC están:

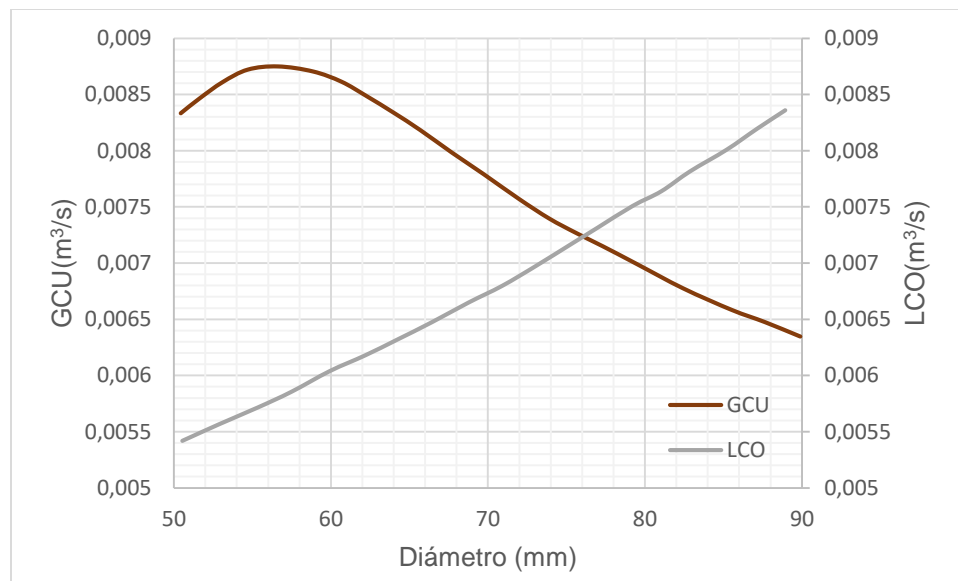
- **Diámetro:** En la parte superior, el separador debe tener un diámetro lo suficientemente grande para que la velocidad superficial del gas sea menor que la velocidad crítica con el fin de evitar la formación de gotas de líquido. Si esto sucede puede haber entrada de líquido en la corriente de salida superior, LCO, (*Liquid Carry-Over*). En la parte inferior, el diámetro debe ser lo suficientemente

¹¹ Hreiz, R., Gentric, C., & Midoux, N. (2011). Numerical investigation of swirling flow in cylindrical cyclones. *Chemical Engineering Research and Design*, 89(12), 2521–2539. <https://doi.org/10.1016/j.cherd.2011.05.001>

pequeño para que sea efectiva la separación y no haya entrada de gas por la corriente inferior, GCU, (*Gas Carry-Under*).¹²

En la Figura 3 se evidencia los efectos que tiene el diámetro del separador sobre la eficiencia de separación del GLCC, se observa que GCU disminuye a medida que aumenta el diámetro principal del ciclón y para el caso del LCO ocurre lo contrario, es decir, este disminuye al disminuir el diámetro principal del ciclón¹³.

Figura 3. Efectos del cambio del diámetro principal del ciclón en LCO y GCU.



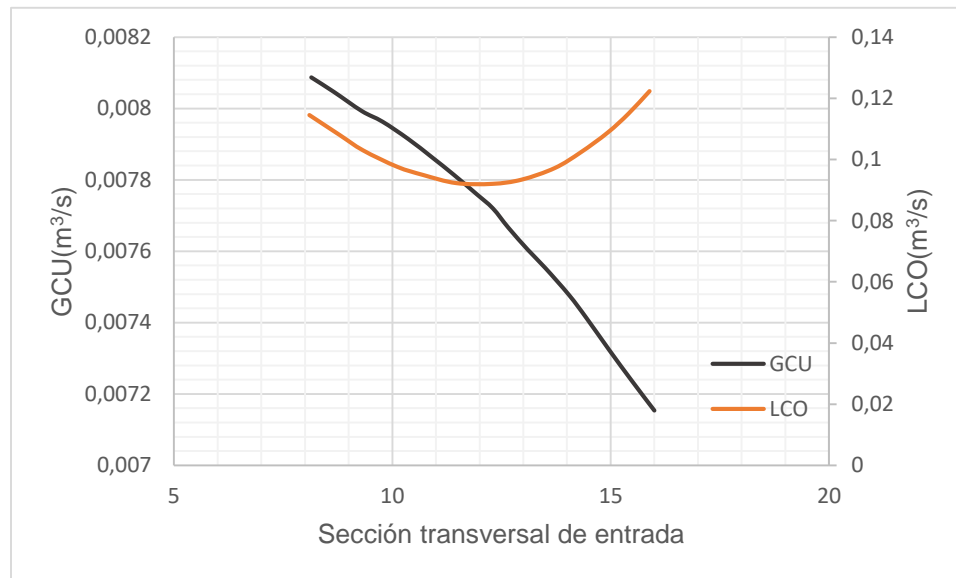
Modificado de: Ghasemi, A., Shams, M., & Heyhat, M. M. (2016). A numerical scheme for optimizing gas liquid cylindrical cyclone separator. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part E: Journal of Process Mechanical Engineering, 231(4), 836–848.

¹² Gomez, L. E., Mohan, R. S., Shoham, O., The, S. P. E., Texaco, J. D. M., Kouba, G. E., Technology, P. (1999). State-of-the-Art Simulator for Field Applications of Gas-Liquid Cylindrical Cyclone Separators. Spe 56581.

¹³ Ghasemi, A., Shams, M., & Heyhat, M. M. (2016). A numerical scheme for optimizing gas liquid cylindrical cyclone separator. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part E: Journal of Process Mechanical Engineering, 231(4), 836–848. <https://doi.org/10.1177/0954408916644002>

La Figura 4 muestra la variación de GCU y LCO con el ancho de entrada. El aumento del ancho de entrada provoca una disminución en la GCU, pero no son linealmente proporcionales. De hecho, al aumentar la sección transversal de la entrada ocasiona una disminución en la velocidad del flujo entrante al ciclón, por ende, el flujo tiene más tiempo de residencia y la separación se lleva a cabo mejor¹⁴.

Figura 4. Efectos de cambiar la sección transversal de entrada en LCO y GCU



Modificado de: Ghasemi, A., Shams, M., & Heyhat, M. M. (2016). A numerical scheme for optimizing gas liquid cylindrical cyclone separator. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part E: Journal of Process Mechanical Engineering*, 231(4), 836–848.

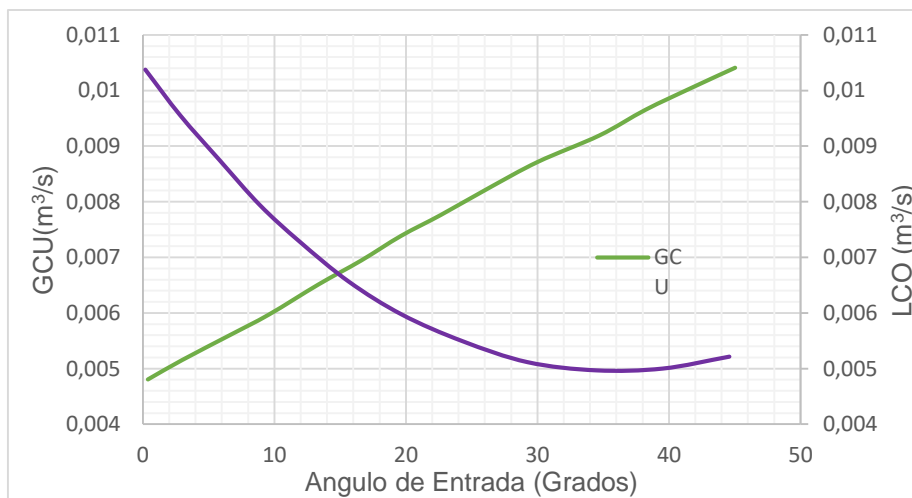
- **Longitud:** La longitud de la parte superior del GLCC por encima de la entrada debe ser lo suficientemente grande para evitar el arrastre de líquido. El valor mínimo recomendado, según la experiencia anterior, es de 4 a 5 pies para un rango de 3 a 6 pulgadas I.D. La longitud de la parte inferior del GLCC debajo de la entrada debe ser lo suficientemente grande con el fin de mantener una

¹⁴ Ghasemi, A., Shams, M., & Heyhat, M. M. (2016). A numerical scheme for optimizing gas liquid cylindrical cyclone separator. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part E: Journal of Process Mechanical Engineering*, 231(4), 836–848. <https://doi.org/10.1177/0954408916644002>

columna de líquido finito debajo del vórtice, a diferentes condiciones de flujo, permitiendo así que exista suficiente tiempo para la separación de las burbujas de la fase líquida y evitar el atrapamiento de Burbujas en la corriente de líquido que sale. El valor recomendado para la longitud de la parte inferior del GLCC es de 4 a 5 pies como mínimo, el rango de I.D es el mismo que se indicó¹⁵.

- **Boquilla de entrada:** El diseño de la boquilla de entrada es de suma importancia en el separador ya que esta 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 adentro. En la mayoría de los estudios a la fecha, la boquilla de entrada tiene un ángulo de 27 grados.¹⁶ En la Figura 5 se observa el estudio realizado por Ghasemi et al. (2016), en donde variaron el ángulo de la boquilla de entrada y cuantificaron el efecto que presentaba sobre el LCO y GCU, demostrando que un ángulo menor a 20° es favorable para evitar arrastre de volúmenes considerables de fluidos por la corriente incorrecta.

Figura 5. Efectos del cambio del ángulo de entrada en LCO y GCU



¹⁵ Gomez, L. E., Mohan, R. S., Shoham, O., The, S. P. E., Texaco, J. D. M., Kouba, G. E., Technology, P. (1999). State-of-the-Art Simulator for Field Applications of Gas-Liquid Cylindrical Cyclone Separators. Spe 56581.

¹⁶ Hreiz, R., Lainé, R., Wu, J., Lemaitre, C., Gentric, C., & Fünfschilling, D. (2013). On the effect of the nozzle design on the performances of gas-liquid cylindrical cyclone separators. International Journal of Multiphase Flow, 58, 15–26. <https://doi.org/10.1016/j.ijmultiphaseflow.2013.08.006>

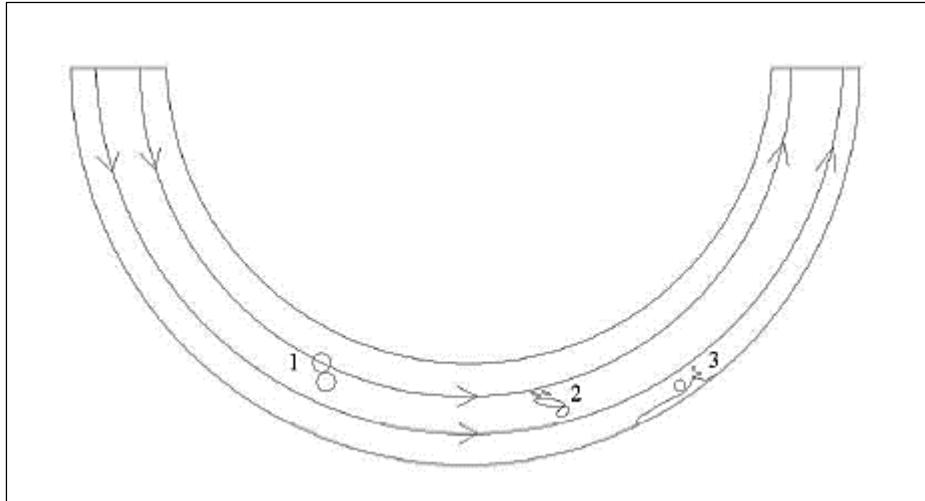
Modificado de: Ghasemi, A., Shams, M., & Heyhat, M. M. (2016). A numerical scheme for optimizing gas liquid cylindrical cyclone separator. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part E: Journal of Process Mechanical Engineering*, 231(4), 836–848

2.3.2. Separación de gotas en GLCC: Las gotas que entran arrastradas por el flujo del gas experimentan diferentes fenómenos mientras se desplazan a través del GLCC en un flujo turbulento. Estos tres tipos de procesos les suceden a las gotas de aceite y se debe considerar cuando se intenta describir con precisión los efectos de las gotas en la eficiencia de separación en un flujo en remolino.¹⁷

- Colisión de gotas: Bajo la influencia del arrastre del flujo de gas, las gotas tienden a chocar entre sí (1, ver Figura 6).
- Ruptura de las gotitas de aceite: debido a la presión generada por la diferencia de velocidad entre las fases de gas y líquido y la pura fuerza del gradiente de velocidad en el flujo de remolino, las gotitas de aceite pueden romperse en gotas más pequeñas (2, ver Figura 6).
- Colisión con pared de gotas de aceite: Debido a la fuerza centrífuga, las gotas se mueven en el lado exterior del anillo y, por lo tanto, chocan continuamente con la pared para formar una película de aceite. Luego cuando la película de aceite está formada, los choques pueden formar salpicaduras de pequeñas gotas de aceite. (3, ver Figura 6).

¹⁷ Wang, L., Feng, J., Gao, X., & Peng, X. (2017). Investigation on the oil - gas separation efficiency considering oil droplets breakup and collision in a swirling flow. *Chemical Engineering Research and Design*, 117, 394–400. <https://doi.org/10.1016/j.cherd.2016.10.033>

Figura 6. Gota en flujo turbulento.



Fuente: Wang, L., Feng, J., Gao, X., & Peng, X. (2017). Investigation on the oil - gas separation efficiency considering oil droplets breakup and collision in a swirling flow. *Chemical Engineering Research and Design*, 117, 394–400. <https://doi.org/10.1016/j.cherd.2016.10.033>

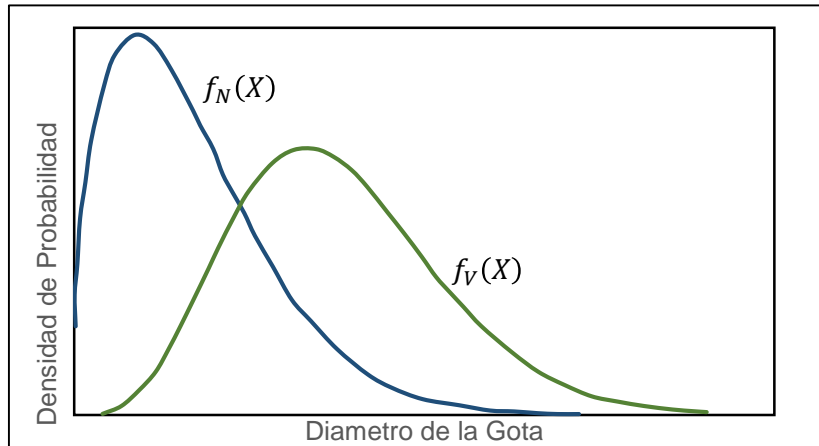
2.3.3. Distribución de tamaño de gota: La distribución del tamaño de gota de un polvo o neblina da una medida de la cantidad de partículas de un determinado diámetro, se puede informar como una distribución de número, longitud, superficie, volumen o masa (peso). Las curvas en la Figura 7 son curvas de densidad. Los valores de la función $f(x)$ representan la fracción de gotas en un intervalo¹⁸. En donde:

$fN(x)dx$ = La fracción numérica de gotas con un diámetro entre $x - 1/2 dx$ y $x + 1/2 dx$

$fV(x)dx$ = La fracción de volumen de gota con un diámetro entre $x - 1/2 dx$ y $x + 1/2 dx$

¹⁸ Hoffmann, A. C., & Stein, L. E. (2007). *Gas Cyclones and Swirl Tubes (Second)*

Figura 7. Distribución de número y densidad de la gota para una muestra.



Modificado de: Hoffmann, A. C., & Stein, L. E. (2007). Gas Cyclones and Swirl Tubes (Second)

Además de las distribuciones de densidad, un método muy utilizado para informar una distribución de tamaño de gota es a través del uso de su "distribución de tamaño acumulativa" $F(x)$, definida como la fracción de gotas con un diámetro menor que x . $F(x)$ está relacionada con la función de densidad $f(x)$ por:

$$f(x) dx = dF(x)$$

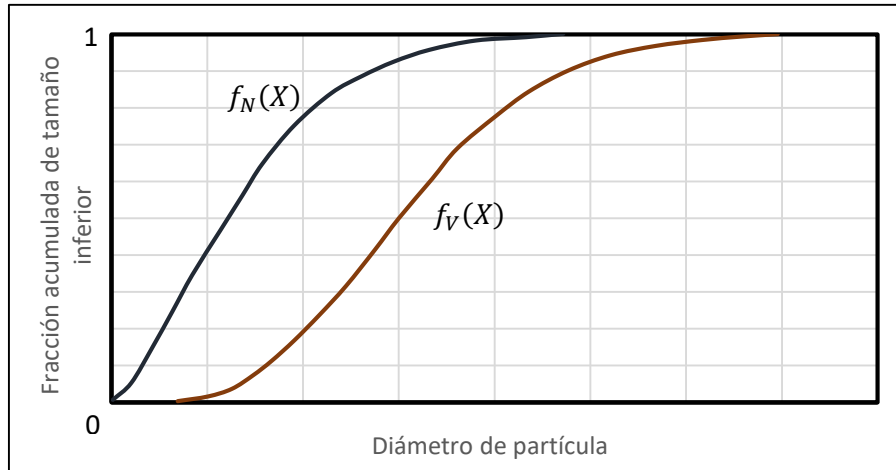
Donde la distribución de densidad acumulativa del ejemplo de la Figura 7 está dado en la

Figura 8.¹⁹

Existen varios modelos de distribución de tamaño de gota, algunas de las cuales se ajustan bastante bien a las distribuciones de tamaño de muchos polvos. Las funciones del modelo más utilizadas con frecuencia son la distribución "normal" (o "gaussiana"), la distribución "log-normal" y la distribución "Rosin-Rammler" (Allen, 1990).

¹⁹ Ibíd., p. 55

Figura 8. Distribución de número y densidad de gota acumulativas para una muestra.



Modificado de: Hoffmann, A. C., & Stein, L. E. (2007). Gas Cyclones and Swirl Tubes (Second)

2.3.4. Estudios GLCC: La Tabla 2 cuenta con algunos estudios experimentales, modelos y simulaciones realizadas al GLCC.

Tabla 2. Estado del arte

Autor	Tipo de Estudio	Objetivo	Modelo de turbulencia	Modelos Multifásico
Joshi (1995)	Estudio experimental	Estudiar la hidrodinámica y modelamiento del comportamiento de la salida del líquido	-----	-----
Arpandi, et al., (1996)	Estudio experimental y modelo mecanístico	Predecir el comportamiento del flujo hidrodinámico en el GLCC	-----	-----
Marti, et al., (1996)	Modelo mecanístico y simulación CFD	Determinar la presencia de gas en la salida de líquido	-----	-----
Erdal et al. (1998)	Simulación CFD	Estudiar el comportamiento de las burbujas de gas en la parte inferior del GLCC	Modelo de turbulencia $k-\epsilon$	Modelo multifluido (CFX)
Mantilla, et al., (1999)	Estudio experimental	Predecir el comportamiento del flujo	-----	-----

	y modelo mecanístico	hidrodinámico en el GLCC		
Movafaghian et al., (2000)	Modelo mecanístico y validación experimental	Investigar el efecto de diferentes geometrías, viscosidades, presiones y surfactantes en un GLCC	-----	-----
Chirinos et al. (2000)	Modelo mecanístico y validación experimental	Estudiar el fenómeno físico LCO en el GLCC	-----	-----
Hreiz et al., (2013)	Estudio Experimental	Estudiar el efecto del diseño de la boquilla de entrada al ciclón.	-----	-----
Hreiz, et al., (2014)	Estudio Experimental	Analizar la hidrodinámica y realizar medidas de las velocidades de flujos remolinos en un GLCC	-----	-----
Ghasemi et al., (2016)	Simulación CFD y validación experimental	Realizar un esquema numérico para la optimización de un separador gas-liquido ciclónico cilíndrico	Modelo de turbulencia Reynold's stress	Modelo Eulerian- Eulerian
Asaadian, et al., (2018)	Estudio Experimental	Analizar el efecto de los cambios de geometría en un GLCC	-----	-----
(Cornejo, et al., 2019)	Simulación CFD	Validar un estudio experimental y analizar el comportamiento fluido- dinámico de una mezcla de gas natural real	Modelo de turbulencia k-ε realizable	Modelo Euler-Euler

3. MODELAMIENTO MATEMATICO

El flujo en un separador ciclónico cilíndrico es incomprensible, y para este tipo de flujo la ecuación de continuidad y balance de cantidad de movimiento son aplicadas para su estudio. La dinámica de fluidos computacional tiene la facultad de un modelado integral para una amplia variedad de problemas de flujo, ya sea de fluido comprensible e incomprensible, laminares y turbulentos. También ofrece la capacidad de análisis en estado estacionario o transitorio.

3.1. ECUACION DE CONTINUIDAD

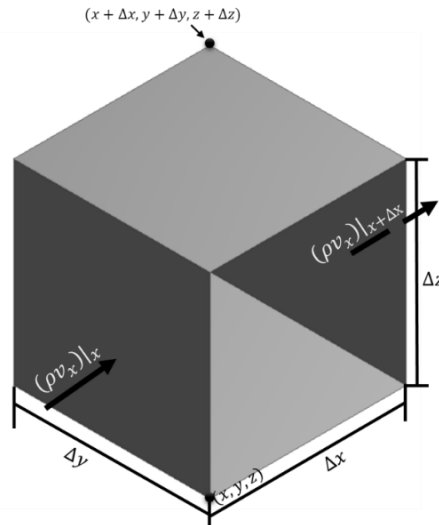
Esta ecuación se desarrolla realizando un balance de materia sobre un pequeño elemento de volumen $\Delta x \Delta y \Delta z$, a través del que circula un fluido (Figura 9). Después se deja que el tamaño de este elemento tienda a cero (por lo que se considera al fluido como un continuo) y se obtiene la ecuación diferencial parcial deseada.

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Velocidad} \\ \text{de aumento} \\ \text{de materia} \end{array} \right\} = \left\{ \begin{array}{l} \text{Velocidad} \\ \text{de entrada} \\ \text{de materia} \end{array} \right\} - \left\{ \begin{array}{l} \text{Velocidad} \\ \text{de salida} \\ \text{de materia} \end{array} \right\} \quad (1)$$

Para traducir el anterior enunciado físico a un lenguaje matemático se empieza por considerar las dos caras sombreadas de la Figura 9 las cuales son perpendiculares al eje x . La velocidad de entrada de materia en el elemento de volumen a través de la cara sombreada en x es $(\rho v_x)|_x \Delta y \Delta z$, y la velocidad de salida de materia a través de la cara sombreada en $x + \Delta x$ es $(\rho v_x)|_{x+\Delta x} \Delta y \Delta z$. Se pueden escribir expresiones semejantes para los otros pares de caras. La velocidad de incremento de materia dentro del elemento de volumen es $\Delta x \Delta y \Delta z \left(\frac{\partial \rho}{\partial t} \right)$. Por lo tanto, el balance de materia queda como:

$$\begin{aligned} \Delta x \Delta y \Delta z \frac{\partial \rho}{\partial t} &= \Delta y \Delta z [(\rho v_x)|_x - (\rho v_x)|_{x+\Delta x}] \\ &+ \Delta x \Delta z [(\rho v_y)|_y - (\rho v_y)|_{y+\Delta y}] \\ &+ \Delta x \Delta y [(\rho v_z)|_z - (\rho v_z)|_{z+\Delta z}] \end{aligned} \quad (2)$$

Figura 9. Elemento de volumen fijo $\Delta x \Delta y \Delta z$ a través del que circula un fluido. Las flechas indican la densidad de flujo de materia de entrada y salida en el volumen en las caras sombreadas localizadas en x y $x + \Delta x$.



Modificado de: Bird, R. B., Stewart, W. E., & Lightfoot, E. N. (1964). Fenómenos de transporte. In Fenómenos de transporte.

Al dividir toda la ecuación en $\Delta x \Delta y \Delta z$ y tomar el límite cuando Δx , Δy y Δz tienden a cero, luego usando la definición de derivadas parciales se obtiene la ecuación de continuidad, la cual describe la velocidad de variación respecto al tiempo de la densidad del flujo en un punto en el espacio.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = - \left(\frac{\partial}{\partial x} \rho v_x + \frac{\partial}{\partial y} \rho v_y + \frac{\partial}{\partial z} \rho v_z \right) \quad (3)$$

La ecuación (3) se puede escribir de una manera más breve usando notación vectorial:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = -(\nabla \cdot \rho v) \quad (4)$$

El vector ρv es la densidad de flujo de materia y su divergencia tiene un significado simple: es la velocidad neta con que sale o se emite la densidad de flujo de materia por unidad de volumen.²⁰

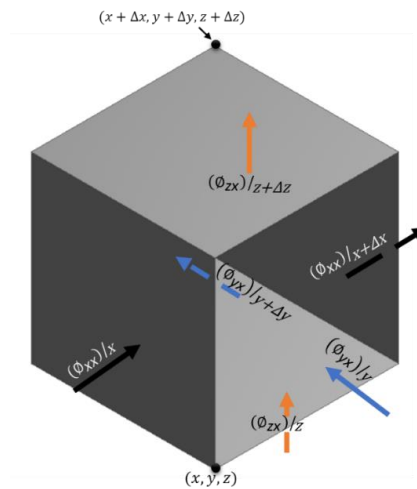
²⁰ Bird, R. B., Stewart, W. E., & Lightfoot, E. N. (1964). Fenómenos de transporte. In Fenómenos de

3.2. ECUACION DE CANTIDAD DE MOVIMIENTO

Primero se debe realizar un balance de cantidad de movimiento sobre el elemento de volumen $\Delta x \Delta y \Delta z$ de la Figura 10 de la siguiente forma:

$$\begin{bmatrix} \text{Velocidad de} \\ \text{incremento de} \\ \text{cantidad} \\ \text{de movimiento} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \text{Velocidad} \\ \text{de entrada} \\ \text{de cantidad} \\ \text{de movimiento} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \text{Velocidad} \\ \text{de salida} \\ \text{de cantidad} \\ \text{de movimiento} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \text{Fuerza} \\ \text{externa} \\ \text{sobre} \\ \text{el fluido} \end{bmatrix} \quad (5)$$

Figura 10. Elemento de volumen fijo $\Delta x \Delta y \Delta z$, con seis flechas que indican la densidad de flujo de cantidad de movimiento en la dirección x a través de las superficies por todos los mecanismos. Las caras sombreadas localizadas en x y $x+\Delta$



Modificado de: Bird, R. B., Stewart, W. E., & Lightfoot, E. N. (1964). Fenómenos de transporte. In Fenómenos de transporte.

En este caso se incluye el término de estado no estacionario y se permite que el fluido se mueva a través de las 6 caras del elemento de volumen. La ecuación (5) es una ecuación vectorial con componentes en cada una de las tres direcciones de

transporte.

coordenadas x, y y z . Se desarrolla la componente de x de cada termino de la anterior ecuación y se procede de la misma manera para las componentes y y z . Primero se analizan las velocidades de flujo de la componente x de cantidad de movimiento de entrada y salida del elemento de volumen que se muestra en la Figura 10. La cantidad de movimiento entra y sale en $\Delta x \Delta y \Delta z$ por dos mecanismos de transporte, convectivo y molecular.

La velocidad a la que la componente x de cantidad de movimiento entra a través de la cara sombreada en x por todos los mecanismos es $(\phi_{xx})|_x \Delta y \Delta z$, y la velocidad a la que sale de la cara sombreada en $x + \Delta x$ es $(\phi_{xx})|_{x+\Delta x} \Delta y \Delta z$. Se puede escribir expresiones semejantes para las otras caras. Al sumar estas contribuciones se obtiene la rapidez neta de adicción de cantidad de movimiento en la dirección x a través de los tres pares de caras.

$$\Delta y \Delta z \left((\phi_{xx})|_x - (\phi_{xx})|_{x+\Delta x} \right) + \Delta x \Delta z \left((\phi_{yx})|_y - (\phi_{yx})|_{y+\Delta y} \right) + \Delta x \Delta y \left((\phi_{zx})|_z - (\phi_{zx})|_{z+\Delta z} \right) \quad (6)$$

Luego está la fuerza externa (la fuerza de gravedad) que actúa sobre el fluido en el elemento de volumen. La componente x de esta fuerza es:

$$\rho g_x \Delta x \Delta y \Delta z \quad (7)$$

Las ecuaciones (6) y (7) proporcionan las componentes de x de los tres términos en el miembro derecho de la ecuación (5). Por eso, la suma de estos términos debe igualarse a la velocidad de incremento de cantidad de movimiento en la dirección x dentro del elemento de volumen $\Delta x \Delta y \Delta z \frac{\partial(\rho v_x)}{\partial t}$. Al hacer lo anterior se obtiene la componente en la dirección x del balance de cantidad de movimiento. Cuando esta ecuación se divide entre $\Delta x \Delta y \Delta z$ y se toma el límite cuando $\Delta x, \Delta y$ y Δz tienden a cero, y luego usando la definición de derivadas parciales resulta la siguiente ecuación:

$$\frac{\partial}{\partial t} \rho v_x = - \left(\frac{\partial}{\partial x} \phi_{xx} + \frac{\partial}{\partial y} \phi_{yx} + \frac{\partial}{\partial z} \phi_{zx} \right) + \rho g_x \quad (8)$$

Ecuaciones semejantes pueden obtenerse para las componentes en las direcciones y y z del balance de cantidad de movimiento:

$$\frac{\partial}{\partial t} \rho v_y = - \left(\frac{\partial}{\partial x} \phi_{xy} + \frac{\partial}{\partial y} \phi_{yy} + \frac{\partial}{\partial z} \phi_{zy} \right) + \rho g_y \quad (9)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} \rho v_z = - \left(\frac{\partial}{\partial x} \phi_{xz} + \frac{\partial}{\partial y} \phi_{yz} + \frac{\partial}{\partial z} \phi_{zz} \right) + \rho g_z \quad (10)$$

Al usar notación vectorial-tensorial, estas tres ecuaciones pueden escribirse como:

$$\frac{\partial}{\partial t} \rho v_i = [\nabla \cdot \phi]_i + \rho g_i \quad i = x, y, z \quad (11)$$

Las cantidades ρv_i , son las componentes cartesianas del vector ρv , que representa la cantidad de movimiento por unidad de volumen en un punto en el fluido. De igual manera, las cantidades ρg_i , son las componentes del vector ρg , q es la fuerza externa por unidad de volumen. El término $-[\nabla \cdot \phi]_i$ es la i -ésima componente del vector $-\nabla \cdot \phi$.

Cuando la i -ésima componente de la ecuación (11) se multiplica con el vector unitario en la i -ésima dirección y las tres componentes se suman vectorialmente, se obtiene el planteamiento diferencial de la ley de conservación de cantidad de movimiento.²¹

$$\frac{\partial}{\partial t} \rho v = -[\nabla \cdot \phi] + \rho g \quad (12)$$

3.3. PLANTEAMIENTO EN CFD

Las ecuaciones que son usadas en un estudio de dinámica de fluidos computacional se basan principalmente en las ecuaciones de conservación de masa, energía o

²¹ Bird, R. B., Stewart, W. E., & Lightfoot, E. N. (1964). Fenómenos de transporte. In Fenómenos de transporte.

momento, siendo estas ecuaciones diferenciales parciales y por ende no tienen una solución analítica. Estas ecuaciones son complementadas con otras relaciones y/o ecuaciones de estado, con el fin de dar solución al problema planteado.

3.3.1. Modelo de flujo multifásico: En la naturaleza, se puede encontrar distintos regímenes de flujo, y estos se pueden agrupar en cinco categorías: flujos gas-líquido, líquido-líquido, gas-sólido, líquido-sólido o flujos en tres fases. El primer paso para resolver cualquier problema multifase es determinar el régimen de flujo que representa mejor el flujo de trabajo. En esta investigación se estudió un régimen de flujo gas-líquido. Actualmente hay dos enfoques para el cálculo numérico de flujos multifásicos: el enfoque de Euler-Lagrange y el enfoque de Euler-Euler, siendo el primero el usado para este trabajo.

En el enfoque Euler-Lagrange, la fase fluida se trata como un proceso continuo al resolver las ecuaciones de transporte, mientras que la fase dispersa se resuelve rastreando un gran número de partículas, burbujas o gotas a través del campo de flujo calculado. La fase dispersa puede intercambiar cantidad de movimiento, masa y energía con la fase fluida. Las trayectorias de partículas o gotas se calculan individualmente a intervalos específicos durante el cálculo de la fase del fluido. Esto hace que el modelo sea apropiado para el modelado de secadores por aspersion, combustión de carbón y combustible líquido y algunos flujos cargados de partículas, pero inadecuado para el modelado de mezclas líquido-líquido, lechos fluidizados o cualquier aplicación donde la fracción de volumen de la segunda fase no puede ser descuidada. Para aplicaciones como estas, las interacciones partícula-partícula pueden incluirse usando el modelo de elementos discretos.

El modelo de mezcla de ANSYS-FLUENT permite modelar flujos multifásicos cuando las fases del flujo tienen diferentes velocidades, pero suponen un equilibrio local en escalas de longitud corta. Este modelo puede modelar fases resolviendo las ecuaciones de cantidad de movimiento, continuidad y energía, las ecuaciones de la fracción de volumen para las fases secundarias y las expresiones algebraicas para las velocidades relativas. Las aplicaciones típicas incluyen sedimentación, separadores ciclones, flujos cargados de partículas con baja carga y flujos burbujeantes donde la fracción de volumen de gas permanece baja. Las ecuaciones que constituyen este modelo se presentan a continuación:

- Velocidad Promedio
$$\vec{v}_m = \frac{\sum_{k=1}^n \alpha_k \rho_k \vec{v}_k}{\rho_m} \quad (13)$$

- Densidad de la mezcla
$$\rho_m = \sum_{k=1}^n \alpha_k \rho_k \quad (14)$$

- Viscosidad de la mezcla
$$\mu_m = \sum_{k=1}^n \alpha_k \mu_k \quad (15)$$

- Cambio de velocidad
$$\vec{v}_{dr,k} = \vec{v}_k - \vec{v}_m \quad (16)$$

- Velocidad relativa
$$\vec{v}_{pq} = \vec{v}_p - \vec{v}_q \quad (17)$$

- Fracción molar
$$c_k = \frac{\alpha_k \rho_k}{\rho_m} \quad (18)$$

- Relación de velocidades
$$\vec{v}_{dr,p} = \vec{v}_{pq} - \sum_{k=1}^n c_k \vec{v}_{qk} \quad (19)$$

3.3.2. Modelo de fase discreta: Para el estudio del movimiento de partículas se usó el modelo de fase discreta (DPM). Este modelo predice la trayectoria de una partícula de fase discreta (o gota o burbuja) al integrar el balance de fuerza en la partícula, que está escrito en un marco de referencia lagrangiano. Este balance de fuerza equipara la inercia de la partícula con las fuerzas que actúan sobre la partícula, y puede escribirse como:

$$\frac{d\vec{u}_p}{dt} = \frac{18\mu}{\rho_p d_p^2} \frac{C_d Re}{24} (\vec{u} - \vec{u}_p) + \frac{\vec{g}(\rho_p - \rho)}{\rho_p} + \vec{F} \quad (20)$$

En donde \vec{u} es la velocidad de la fase fluida, \vec{u}_p es la velocidad de la partícula, μ es la viscosidad molecular del fluido, ρ_p es la densidad de la partícula, ρ es la densidad del fluido, d_p es el diámetro de la partícula y C_d es el coeficiente de arraste de las partículas esféricas. El primer término en el lado derecho de la ecuación (20) representa la fuerza de arrastre que actúa sobre una partícula por el fluido circundante, el segundo término representa la fuerza gravitacional y el tercer término es un resumen de todas las demás fuerzas que pueden actuar sobre una partícula, la fuerza del gradiente de presión y la fuerza de flotación.

La rotación de partículas es una parte natural del movimiento de partículas y puede tener una influencia significativa en la trayectoria de una partícula que se mueve en un fluido. El impacto es aún más pronunciado para partículas grandes y / o pesadas con altos momentos de inercia. En este caso, si la rotación de partículas no se toma en cuenta en los estudios de simulación, las trayectorias de partículas resultantes pueden diferir significativamente de las rutas de partículas reales.

3.3.3. Modelo de turbulencia: La turbulencia es un régimen de flujo caracterizado por baja difusión de momento, alta convección y cambios rápidos de presión y velocidad. La turbulencia surge de la inestabilidad en el flujo cuando la amortiguación viscosa de las fluctuaciones de velocidad es más lenta que el transporte por convección. Los flujos turbulentos contienen un amplio rango de escalas de tiempo y longitud. Las grandes escalas de movimiento son mucho más energéticas que las pequeñas. Su tamaño y fuerza las hace el mecanismo predominante de transporte de propiedades. Las pequeñas escalas son mucho más débiles y tienen poca relevancia en el transporte de propiedades. Lo anterior indica que una simulación que trate con más detalle a los grandes remolinos que a los pequeños permite lograr buenos resultados. La turbulencia está descrita, por las ecuaciones de Navier-Stokes, pero la solución de estas ecuaciones requiere un costo computacional elevado, es por ello que se aplican procedimientos de promediación, siendo la propuesta de Reynolds en 1895 la más usada la cual está basada en la descomposición de las variables de flujo en un valor medio y otro fluctuante, a esta promediación se conoce como el sistema de ecuaciones de *Reynolds Average Navier-Stokes*, (RANS). Sin embargo, este proceso de promediación introduce términos desconocidos adicionales en las ecuaciones de transporte (tensiones y flujos de Reynolds) que deben proporcionarse mediante modelos de turbulencia adecuados (cierres de turbulencia), es por ellos que se han propuesto una gran variedad de modelos; estos modelos se dividen en ecuaciones de cierre de primer y segundo orden. En los modelos de primer orden, cabe destacar el modelo de viscosidad turbulenta de torbellinos (*Turbulent Eddy Viscosity Model*) y en los de segundo orden, el modelo de transporte de los esfuerzos de Reynolds, RSTM (*Reynolds Stress Transport Model*) y el modelo algebraico de los esfuerzos de Reynolds. La calidad de la simulación puede depender de manera crucial del modelo de turbulencia seleccionado y es importante realizar la elección correcta del modelo, así como proporcionar una cuadrícula numérica adecuada para el modelo seleccionado.

El modelo que se aplicó para la realización del trabajo, es el modelo de turbulencia realizable k-ε, el cual junto a los modelos Estándar k-ε, RNG k-ε, SST k-ω y RSM son tipo RANS.

- **Modelo Estándar k-ε:** Es un modelo semi empírico basado en las ecuaciones de transporte para la energía cinética turbulenta [k] y para la disipación de la energía cinética turbulenta [ε]. En la derivación del modelo, se asume que el flujo es totalmente turbulento y que los efectos de la viscosidad molecular son despreciables. Por lo tanto, este modelo es válido para flujos totalmente turbulentos. El modelo utiliza la aproximación de función de pared escalable para mejorar la robustez y la exactitud cuando la malla cercana a la pared es muy fina.

A continuación, se presenta las expresiones matemáticas del modelo estándar k-ε:²²

Energía cinética turbulenta [k]

$$\frac{\partial(\rho\bar{u}k)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho\bar{v}k)}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial y} \right] + P_k + G_k - \rho\varepsilon - Y_M \quad (21)$$

Disipación de la energía cinética turbulenta (ε)

$$\frac{\partial(\rho\bar{u}\varepsilon)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho\bar{v}\varepsilon)}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial y} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} [P_k + C_{3\varepsilon} G_k] - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (22)$$

En las expresiones anteriores, P_k representa la generación de la energía cinética turbulenta debido al gradiente de velocidad, G_k es la generación de la energía cinética turbulenta debido a las fuerzas de flotación y μ_t es la viscosidad

²² Launder, B. E., & Spalding, D. B. (1974). THE NUMERICAL COMPUTATION OF TURBULENT FLOWS. Science, 3, 269–289

turbulenta. Los términos $C_{1\varepsilon}$, $C_{2\varepsilon}$ y $C_{3\varepsilon}$ son constantes; mientras que σ_k y σ_ε son los números de Prandtl turbulentos para las ecuaciones de k y ε , respectivamente.²³

- **Modelo realizable k-ε:** Este modelo satisface ciertas limitaciones en el término de los esfuerzos normales, consistentemente con la física de los flujos turbulentos. El modelo reformula el término de viscosidad turbulenta y propone una nueva ecuación de transporte. Como modelo de turbulencia se emplea en geometrías o estructuras complejas, flujos en rotación y capas límites sometidas a gradientes de presión adversos.

El modelo realizable k-ε fue propuesto por Shih et al. En 1995, para hacer frente a las deficiencias presentadas por los modelos k-ε tradicionalmente utilizados; adoptando una ecuación nueva para la viscosidad turbulenta involucrando la variable C_μ originalmente propuesta por Reynolds y una ecuación para la disipación de la energía cinética turbulenta, basada en la ecuación de la raíz media de la fluctuación de la vorticidad.²⁴

Las ecuaciones de este modelo son:

Energía cinética turbulenta [k]

$$\frac{\partial(\rho\bar{u}k)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho\bar{v}k)}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial y} \right] + P_k + G_k - \rho\varepsilon - Y_M \quad (23)$$

Disipación de la energía cinética turbulenta (ε)

$$\frac{\partial(\rho\bar{u}\varepsilon)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho\bar{v}\varepsilon)}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial y} \right] + \rho C_1 - \rho C_{2\varepsilon} \frac{\varepsilon^2}{k + \sqrt{v\varepsilon}} + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} C_{3\varepsilon} G_b \quad (24)$$

²³ *Ibíd.*, p.272

²⁴ Shih, T. H., Liou, W. W., Shabbir, A., Yang, Z., & Zhu, J. (1995). A new k-ε eddy viscosity model for high reynolds number turbulent flows. *Computers and Fluids*, 24(3), 227–238. [https://doi.org/10.1016/0045-7930\(94\)00032-T](https://doi.org/10.1016/0045-7930(94)00032-T)

4. MODELO NUMÉRICO

En CFD, se busca la solución aproximada de las ecuaciones de conservación a partir de métodos numéricos, discretizando el volumen de control y las ecuaciones diferenciales en ecuaciones algebraicas. Existen diversos métodos numéricos para el desarrollo de las ecuaciones de flujo: volúmenes finitos, elementos finitos y diferencias finitas, en donde el más implementado es el método de volúmenes finitos debido a su simplicidad conceptual y a que puede adaptarse a cualquier tipo de mallado, sea estructurado o no estructurado. El objetivo de este método es obtener un sistema de ecuaciones algebraicas por cada volumen de control del sistema. En este método se suele partir de una discretización previa del dominio de cálculo en elementos, normalmente triángulos o cuadriláteros, a partir de los cuales se construye la nueva malla de celdas o volúmenes finitos. En cada uno de estos volúmenes se realiza la discretización de la forma integral de las ecuaciones, que expresan leyes de conservación y que, mediante la aplicación del teorema de la divergencia se simplifican notablemente. Las expresiones resultantes establecen la exacta conservación de propiedades relevantes del flujo en cada celda. Los términos de las ecuaciones se sustituyen por aproximaciones del tipo diferencias finitas, obteniendo ecuaciones algebraicas que se resuelven por un proceso iterativo.

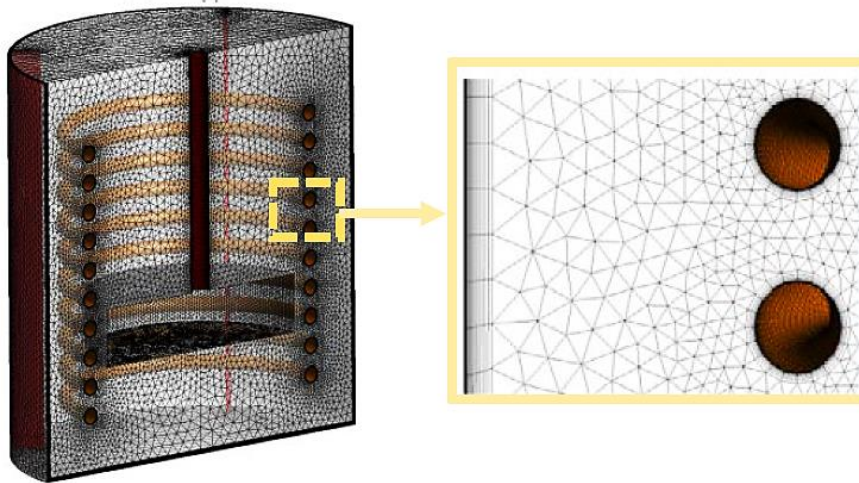
La discretización de las ecuaciones de transporte se puede ver más fácilmente considerando la ecuación de conservación no estacionaria para una cantidad de transporte determinada φ , escrita en forma integral para un volumen de control arbitrario V , mostrada a continuación²⁵:

$$\int_V \frac{\partial \rho \varphi}{\partial t} dV + \oint \rho \varphi \vec{V} \cdot d\vec{A} = \oint \Gamma_\varphi \nabla \varphi \cdot d\vec{A} + \int_V S_\varphi dV \quad (25)$$

²⁵ Prieto, Natalia, Simulação da combustão de coque em regeneradores FCC usando fluidodinâmica computacional, 2011.

En la Figura 11 se observa un ejemplo de discretización en volúmenes de control por este método, realizado para un reactor de tanque agitado, cuya malla generada fue de tipo tetraédrica tridimensional no estructurada con prismas en la pared.²⁶

Figura 11. Discretización del reactor de tanque agitado en volúmenes de control.



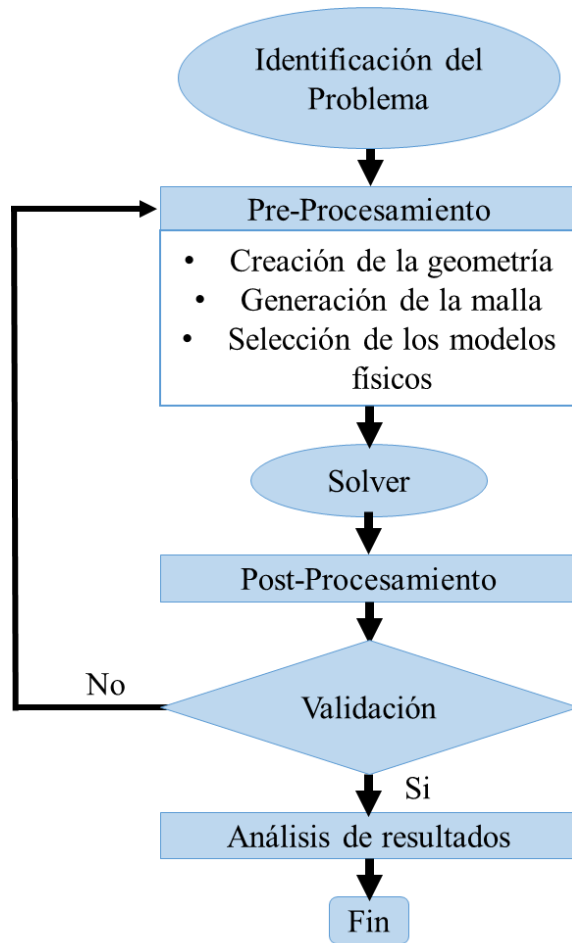
Adaptado de: Prada, J. (2015). OBTENÇÃO DE CORRELAÇÕES DE NUSSELT EM REATORES DE TANQUE AGITADO ATRAVÉS DA FLUIDODINÂMICA COMPUTACIONAL (CFD).

²⁶ Prada, J. (2015). OBTENÇÃO DE CORRELAÇÕES DE NUSSELT EM REATORES DE TANQUE AGITADO ATRAVÉS DA FLUIDODINÂMICA COMPUTACIONAL (CFD).

5. METODOLOGÍA

En el presente capítulo se presentará la metodología desarrollada para la realización del proyecto. La primera etapa consiste en la identificación del problema en donde se concreta el dominio del trabajo de simulación. Una vez definido el dominio de trabajo, se hace el Pre-Procesamiento el cual consiste en 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, se procede a realizar el análisis de los resultados. La metodología propuesta se muestra en la Figura 12.

Figura 12. Metodología



5.1. IDENTIFICACIÓN DEL PROBLEMA

En el presente trabajo se analiza el comportamiento fluido-dinámico de una mezcla gas-líquido en un separador GLCC y el efecto del tamaño de gota y velocidad de entrada en la eficiencia de separación. Para tal fin, se evaluaron 3 diferentes velocidades de entrada, 20 ft/s, 40 ft/s y 60 ft/s y 3 tamaños de gota, 100 μm , 120 μm , 140 μm . Estas velocidades se encuentran en el rango de manejo de la velocidad de flujo en tuberías en superficie para evitar el asentamiento de partículas presentes en el fluido o el desgaste de la tubería por las mismas.²⁷ Los tamaños de gota de aceite presentes en el gas fueron tomados en base a lo recomendado por la literatura.²⁸ La sustancia utilizada fue un gas natural sintético (Figura 16). La geometría usada está basada en las dimensiones presentadas por Hreiz *et al.*,²⁹ la cual fue validada y modificada por Cornejo *et al.*,³⁰

5.2. 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 la simulación.

5.2.1. Geometría: La creación de la geometría tridimensional se realiza en el programa Desing Modeler disponible en el paquete de servicios ofrecidos por el

²⁷ Arnold, K., & Stewart, M. (2008). Surface Production Operations (Third Edit).

²⁸ Kharoua, N., Khezzar, L., & Saadawi, H. (2013). CFD Modelling of a Horizontal Three-Phase Separator: A Population Balance Approach. 3(4), 101–118. <https://doi.org/10.5923/j.ajfd.20130304.03>

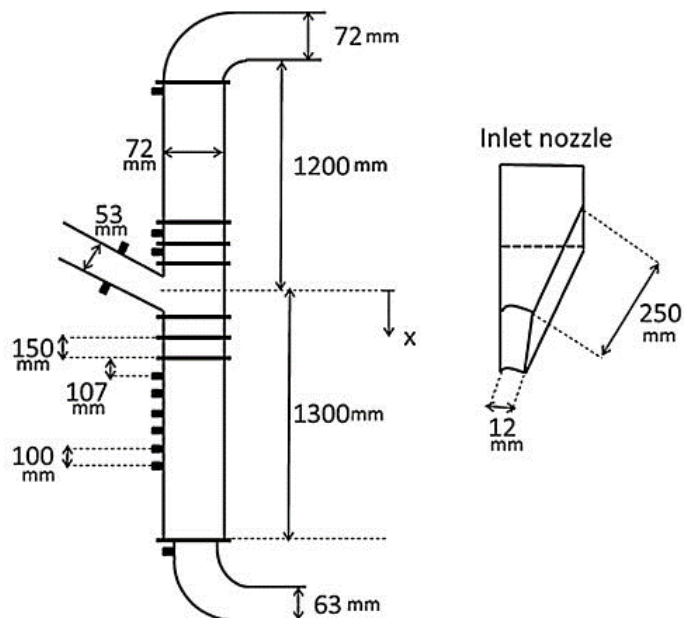
²⁹ Hreiz, R., Gentric, C., Midoux, N., Lainé, R., & Fünfschilling, D. (2014). Hydrodynamics and velocity measurements in gas – liquid swirling flows in cylindrical cyclones &. Chemical Engineering Research and Design, (August 2013), 1–16. <https://doi.org/10.1016/j.cherd.2014.02.029>

³⁰ Cornejo, J. S., Prieto, N., Gonzalez, G., & Chaves-Guerrero, A. (2019). Numerical Simulation of a Natural Gas Cylindrical Cyclone Separator Using Computational Fluid Dynamics. Industrial & Engineering Chemistry Research, *acs.iecr.9b01217*. <https://doi.org/10.1021/acs.iecr.9b01217>

software ANSYS. Las dimensiones utilizadas fueron propuestas por Hreiz et al., las cuales se muestran en la Figura 13.

En la Figura 14, se muestra la geometría usada en la simulación. Esta geometría viene de una validación experimental³¹ y para mejores correlaciones en la simulación se decidió eliminar los codos debido a que estos generan un mayor consumo de tiempo y esfuerzo computacional para los cálculos

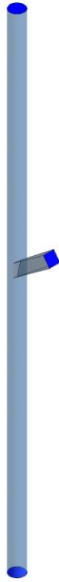
Figura 13. Dimensiones del separador GLCC.



Fuente: Hreiz, R., Gentric, C., Midoux, N., Lainé, R., & Fünfschilling, D. (2014). Hydrodynamics and velocity measurements in gas – liquid swirling flows in cylindrical cyclones &. *Chemical Engineering Research and Design*, (August 2013), 1–16. <https://doi.org/10.1016/j.cherd.2014.02.029>

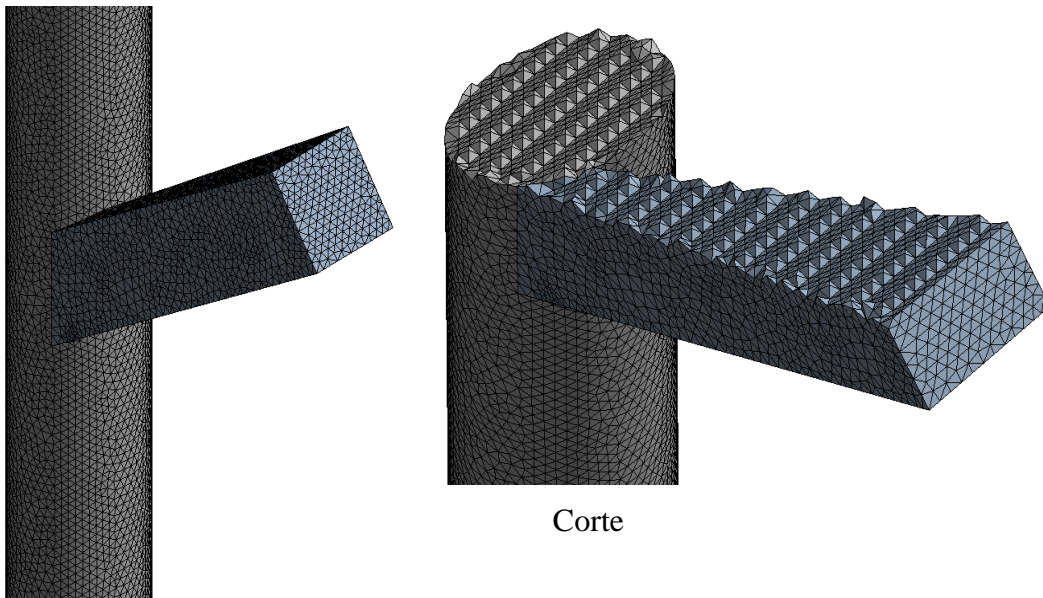
³¹ Hreiz. Op. Cit., p.8

Figura 14. Geometría



5.2.2. Malla: La generación del mallado fue realizada por medio del programa *meshing* disponible en el software ANSYS. La malla que se genera con mejores propiedades está compuesta por tetraedros con un tamaño máximo de elementos de 5 milímetros. En la Figura 15 se muestra la malla generada para la geometría usada.

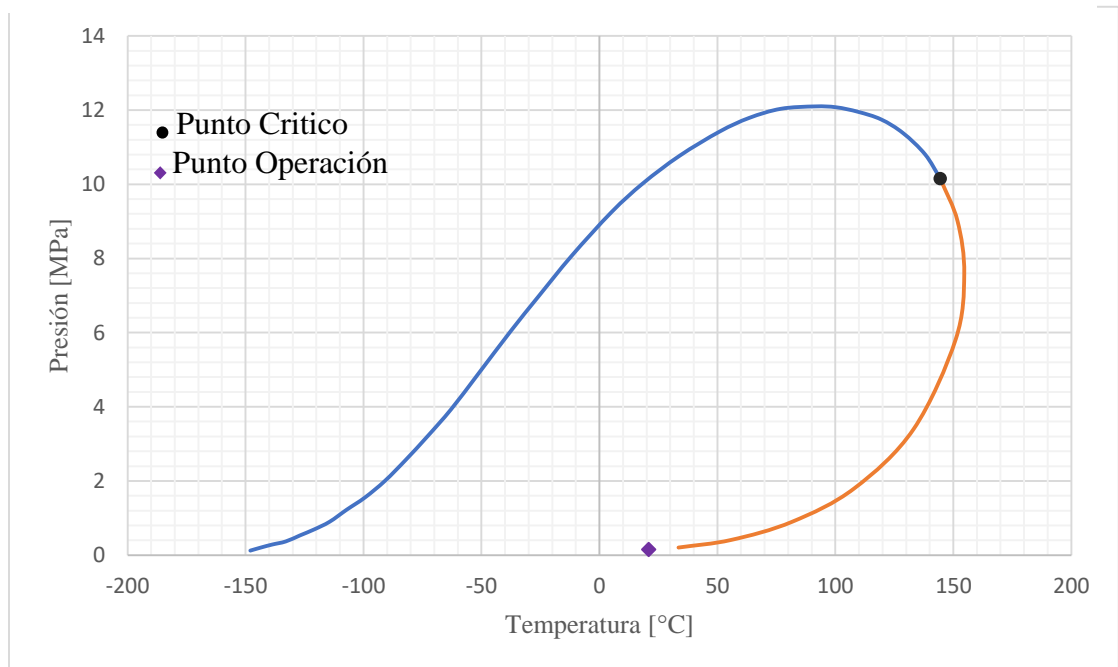
Figura 15. Malla



5.2.3. 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 estudio del movimiento de partículas se usó el modelo DPM.

5.2.4. Propiedades del Fluido: El fluido utilizado para el estudio fue un gas natural sintético. En Figura 16 se presenta el diagrama de fases P-T del fluido usado. En este diagrama se observa el punto de operación el cual se encuentra a una presión de 0,15MPa y una temperatura de 21°C.

Figura 16. Diagrama de fase Presión-Temperatura



Con ayuda del software HYSYS se caracterizó el gas sintético usado. En la Tabla 3 se presentan algunas de las propiedades del fluido.

Tabla 3. Propiedades del gas sintético

PROPIEDAD	FASE VAPOR	FASE LIQUIDA
Peso Molecular	39,54	71,72
Densidad [Kg/m ³]	2,471	623,6
Viscosidad [cP]	9,456*10 ⁻³	0,2262
Fracción Fase [Base Molar]	0,8862	0,1138
Volumen Molar [m ³ /Kgmole]	16	0,1150

5.2.5. Condiciones de Frontera: Las condiciones de frontera son seleccionadas de acuerdo a las necesidades del modelo. Estas, se establecen a cada una de las superficies que constituyen el dominio. Como condición de frontera en cada una de las salidas (salida de gas y salida de líquido), se estableció una presión de salida, para la entrada una velocidad de entrada y para la pared del separador se fijó una condición de no deslizamiento (*no-slip*). Las simulaciones se realizaron en estado estable.

5.3. SOLVER

Posterior a la etapa de Pre-Procesamiento, ANSYS da solución numérica al modelo computacional definido a través del método numérico de volúmenes finitos. La solución obtenida, se desarrolló teniendo en cuenta el criterio de convergencia, con el fin de obtener resultados confiables. Los ajustes establecidos en esta etapa se resumen en la Tabla 4.

Tabla 4. Ajuste numérico para la simulación

AJUSTE NUMÉRICO	ESQUEMA
<i>Discretización de presión</i>	PRESTO
<i>Acoplamiento Velocidad-Presión</i>	SIMPLE
<i>Discretización del momentum</i>	QUICK
<i>Disipación turbulenta</i>	Upwind segundo orden
<i>Energía cinética turbulenta</i>	Upwind segundo orden

En esta etapa el esfuerzo y tiempo computacional depende de la complejidad del problema, el criterio de convergencia, el cual fue de 0,0001, el tamaño de la malla, el paso del tiempo, entre otros. En esta investigación el paso de tiempo no aplica debido a que se trabaja la simulación en estado estable. En la Tabla 5 se presentan las características del computador utilizado para las simulaciones.

Tabla 5. Especificaciones del computador

Características	
<i>Procesador</i>	Intel (R) Core (TM) i7-8700 CPU @ 3,20GHz 3,19 GHz
<i>Tipo de Sistema</i>	Sistema operativo de 64 bits
<i>Memoria RAM</i>	8 GB

5.4. POST-PROCESAMIENTO

En esta etapa, ANSYS ofrece la herramienta CFD-Post, la cual permite el análisis de los resultados obtenidos mediante la creación de contornos, perfiles y gráficas, brindando una visualización detallada de la variable de interés. En el siguiente capítulo se dará a conocer los resultados obtenidos de las simulaciones.

6. ANALISIS DE RESULTADOS

En el presente capítulo se presentan los resultados de las simulaciones y el análisis de las variables a estudiar. Inicialmente, se realizó el test de independencia de malla para poder determinar el número de volúmenes de control adecuados. Luego, se hizo el análisis de los resultados obtenidos, para finalmente evaluar la eficiencia de separación cuando se incluyen una distribución de gota con fenómenos como ruptura y coalescencia.

6.1. TEST DE INDEPENDENCIA DE MALLA

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 verificando si existe algún cambio significativo. Si dicho se presenta, se debe aumentar la cantidad de elementos hasta que los resultados no presenten 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 puesto que a mayor número de elementos el esfuerzo computacional aumentara.

Para el test de independencia de malla se realizó una simulación, variando la posición radial a un metro de distancia de la salida del líquido, con el fin de calcular la velocidad. Se comparó los resultados de la simulación obtenidos con los diferentes números de elementos, como se muestra en la Figura 17 y la Tabla 6.

Figura 17. Test de independencia de malla

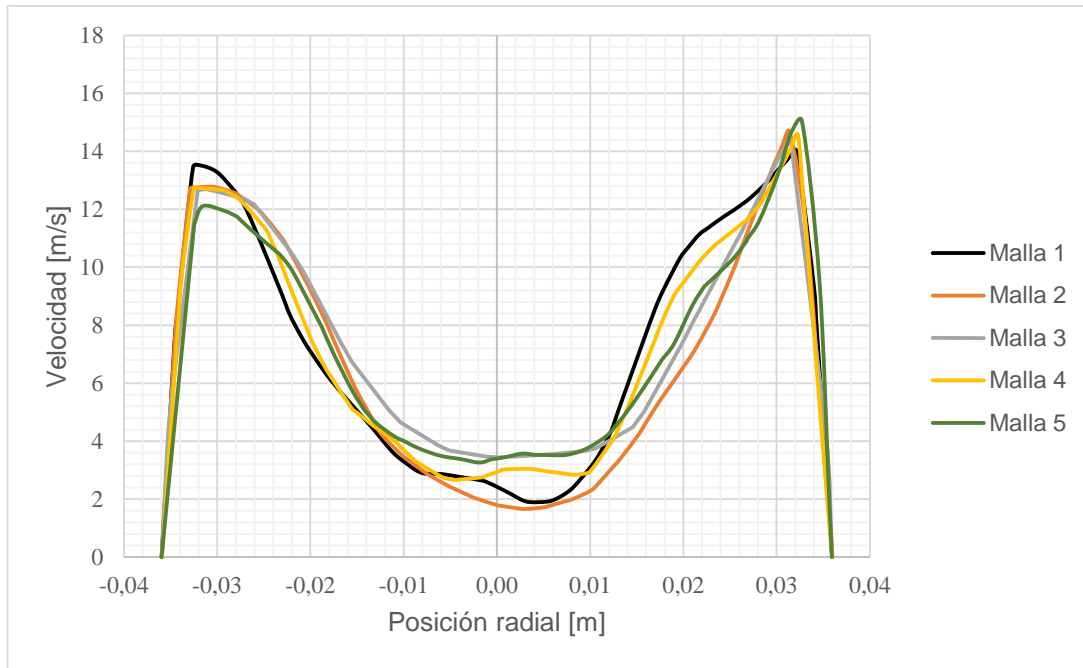


Tabla 6. Número de Elementos y nodos en las diferentes mallas

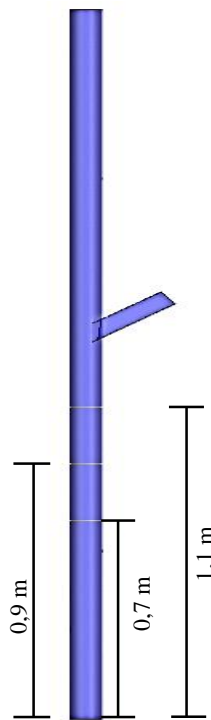
	<i>Malla 1</i>	<i>Malla 2</i>	<i>Malla 3</i>	<i>Malla 4</i>	<i>Malla 5</i>
<i>Número de Nodos</i>	1248082	1298407	1629207	1746497	1844882
<i>Número de Elementos</i>	891758	929136	1169585	1255836	1327071

La diferencia entre los resultados de las mallas 5 y 3, fue inferior al 10%. La malla escogida para eliminar cualquier incertidumbre en las simulaciones fue la número 3, la cual tiene como tamaño máximo de celda 5 mm. Esta decisión se debe a que se requiere de un alto refinamiento, teniendo en cuenta los tamaños de gota, en orden de micras, que se usaron y también se requiere que el esfuerzo computacional no sea demasiado.

6.2. ANALISIS DE FLUJO DE GAS Y TRAYECTORIA DE GOTAS EN EL GLCC

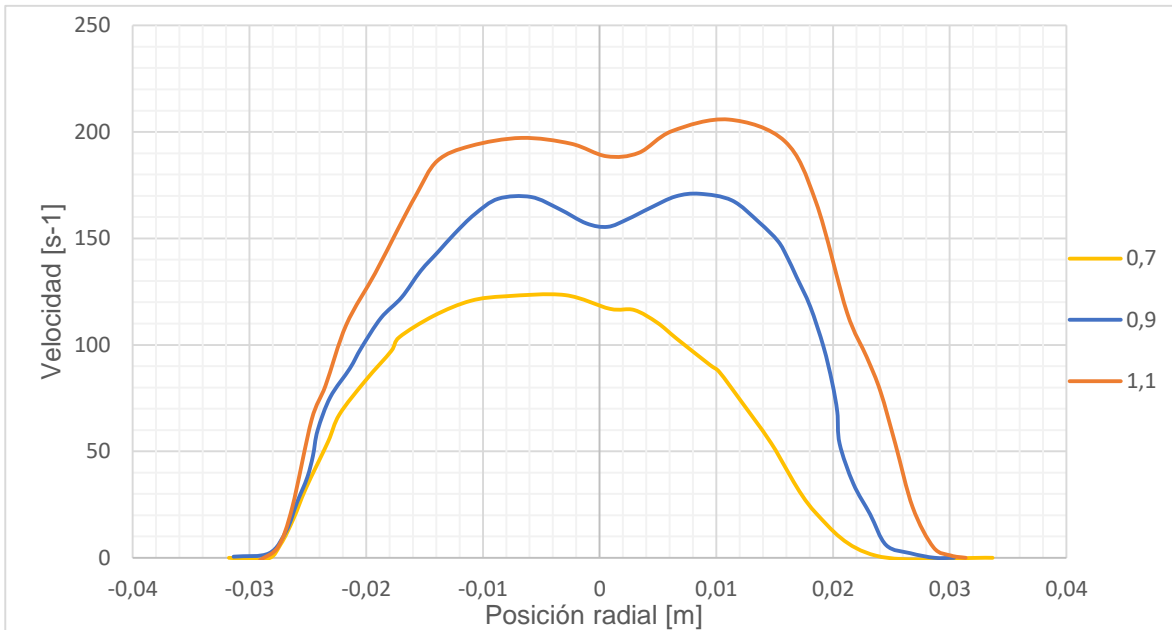
Se evaluó la distribución de las velocidades tangenciales y angulares en tres posiciones radiales desde el fondo del separador con una velocidad de entrada de 20 ft/s. La Figura 18 ilustra las posiciones radiales en donde las velocidades fueron evaluadas.

Figura 18. Posiciones radiales



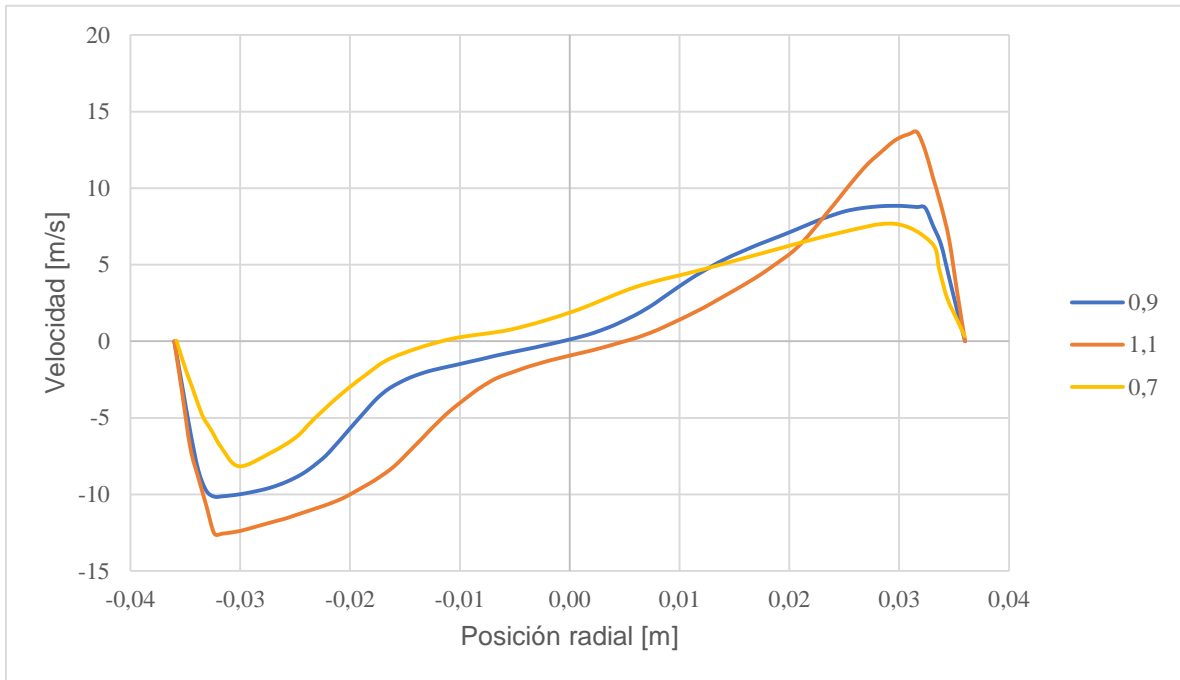
En la Figura 19 y Figura 20 se observa la distribución de la velocidad angular y tangencial a cada posición radial. Se puede ver que a medida que la posición radial aumenta, se hace más clara la presencia del vórtice, esto se debe a lo cercano que es el punto de estudio a la boquilla de entrada.

Figura 19. Distribución de la Velocidad Angular



En la Figura 20 se logra evidenciar con más detalle este efecto y la influencia en la formación del vórtice que genera una sola boquilla de entrada, generando un movimiento en el vórtice respecto al centro del cilindro del separador, en la línea naranja (1,1 m), se observa un desplazamiento de alrededor de 0,005 m hacia la derecha y en la línea amarilla (0,7 m) se observa un desplazamiento de 0,011 m hacia la izquierda, esto evidencia el movimiento del centro del vórtice y filamento de gas a lo largo del radio cilíndrico produciendo una condición de vórtice más inestable y difícil de predecir.

Figura 20. Distribución de la Velocidad Tangencial



6.3. ANÁLISIS DE LA EFICIENCIA DE SEPARACIÓN EN FUNCIÓN DEL TAMAÑO DE GOTA Y VELOCIDAD DE ENTRADA

Se realizaron 9 simulaciones en las que se tomó la fase gaseosa como la fase continua y se hizo un seguimiento Lagrangiano a las gotas de la fase líquida presente en el gas, para esto la eficiencia de separación fue definida como:

$$n = \left(1 - \frac{m_{sg}}{m_{total}}\right) * 100 (\%) \quad (23)$$

Donde m_{sg} es la masa de la fase líquida que sale por la salida de gas y m_{total} es la masa total de líquido que entra por la boquilla de entrada. En la Tabla 7 se exhiben las eficiencias obtenidas para cada caso de simulación. Se evidencia una eficiencia mínima y máxima entre 70 y 92% el cual pertenecen a los casos 1 y 9 respectivamente, mostrando una dependencia directa en el aumento de la eficiencia de la velocidad y el tamaño de gota.

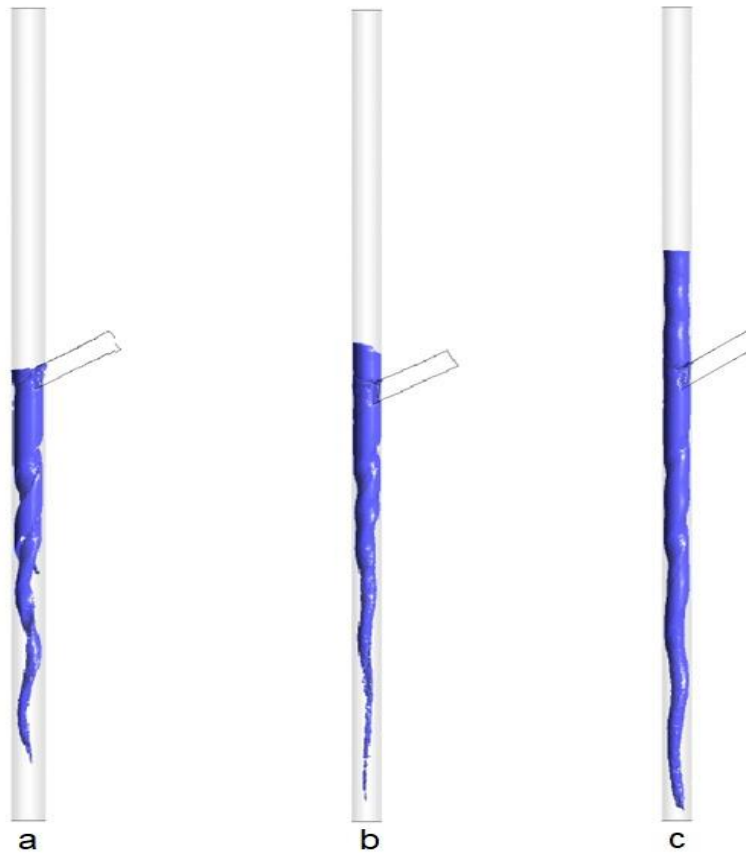
Tabla 7. Resultados de las simulaciones

	100 μm	120 μm	140 μm
20 ft/s	70 %	76,3 %	78 %
40 ft/s	83 %	85 %	86 %
60 ft/s	87 %	91 %	92 %

Teniendo en cuenta q para este análisis se despreciaron fenómenos de ruptura y coalescencia se puede tener una buena correlación con la literatura, el cual nos indica como el aumento de la velocidad al generar una mayor fuerza de vórtice se producen fuerzas mayores sobre las gotas de líquido, desplazándolas hacia las paredes del ciclón para su posterior separación por la salida inferior.

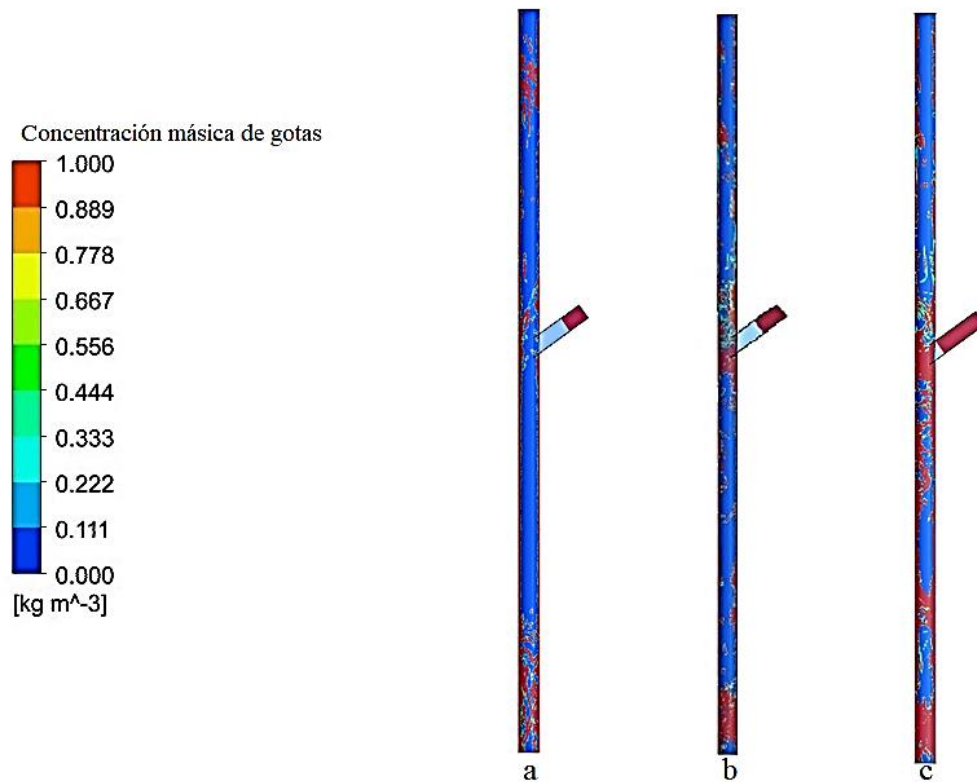
En la Figura 21 se observa el vórtice formado a diferentes velocidades de entrada, (a) 20 ft/s, (b) 40 ft/s y (c) 60 ft/s; en el caso a, cuando se tiene una velocidad de 20 ft/s, se detalla como la parte superior del vórtice no sobrepasa la boquilla de entrada, y la parte inferior o filamento del vórtice tiene una menor definición con respecto a los vórtices de mayor velocidad; en contraste con este, se examina como el vórtice de la figura c medido a 60 ft/s genera un mayor levantamiento del vórtice y un mayor definición y alargamiento del filamento del vórtice hasta llegar cerca de la salida del líquido.

Figura 21. Perfil de Vórtices



También se realizó un análisis de contorno de fracción másica de la fase líquida a una velocidad de 20 ft/s y a diferentes tamaños de gota como se observa en la Figura 22. En esta imagen se observan las distribuciones de las gotas del líquido en el separador, primero se evidencia claramente en todas las imágenes como las gotas al ser de mayor densidad que el gas se aglomeran en las paredes del separador, se percibe como el tamaño de gota genera una distribución de las gotas diferente en el cilindro a lo largo de su eje, en el caso (a), la cual se analiza un tamaño de gota de 100um, se ve mayor cantidad de gotas en la parte superior del cilindro, esto se debe al mayor arrastre del gas hacia la salida superior respecto a los casos (b) y (c). Se observa que las gotas se amontonan en mayor proporción en la parte superior e inferior del cilindro, lo cual se debe a que en estos sectores hay una menor velocidad del gas y en consecuencia una menor turbulencia que disperse las gotas.

Figura 22. Contornos de fracción másica de la fase líquida



6.4. ANÁLISIS DE LA EFICIENCIA DE SEPARACIÓN APLICANDO UNA DISTRIBUCIÓN DE GOTA INCLUYENDO FENÓMENOS DE RUPTURA Y COALESCENCIA

Se aplicó la distribución de gota Rosin-Rammler para la entrada del fluido (Vesilind, 1980):

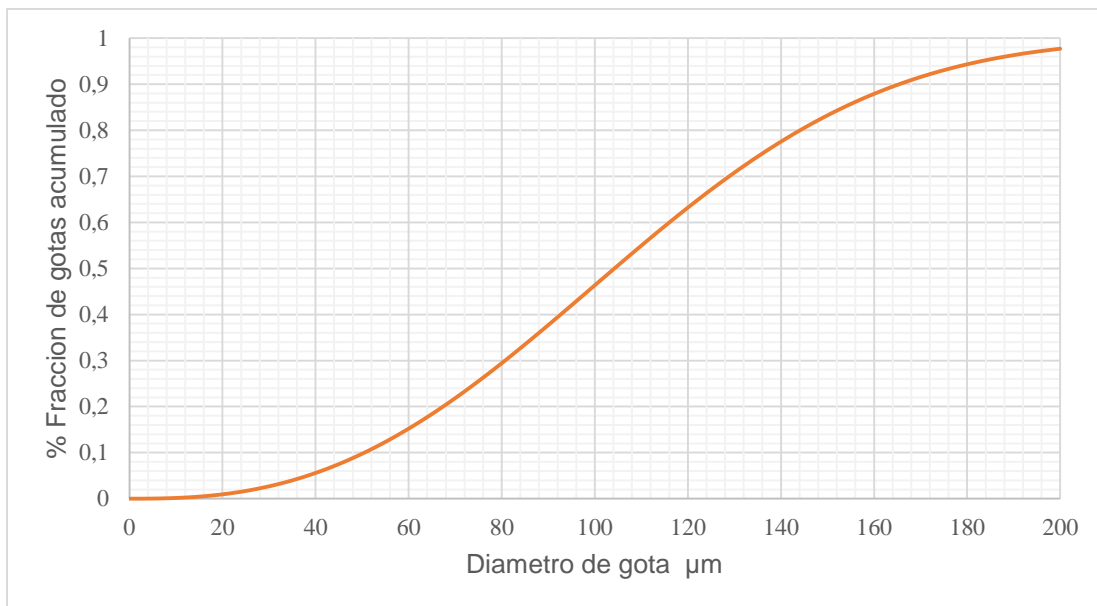
$$Y = 1 - e^{-(d/\bar{d})^\gamma} \quad (24)$$

Donde Y es la fracción acumulada de gotas con diámetro menor a d , \bar{d} es el diámetro medio, y γ es el coeficiente de propagación. Se realizó una revisión en la literatura para poder establecer el parámetro γ , estudios experimentales concluyen que para gotas de petróleo este coeficiente se encuentra en el rango de 2.1-2.8³² y

³² Angeli, P., & Hewitt, G. F. (2000). Drop size distributions in horizontal oil-water dispersed flows. *Chemical Engineering Science*, 55(16), 3133–3143. [https://doi.org/10.1016/S0009-2509\(99\)00585-0](https://doi.org/10.1016/S0009-2509(99)00585-0)

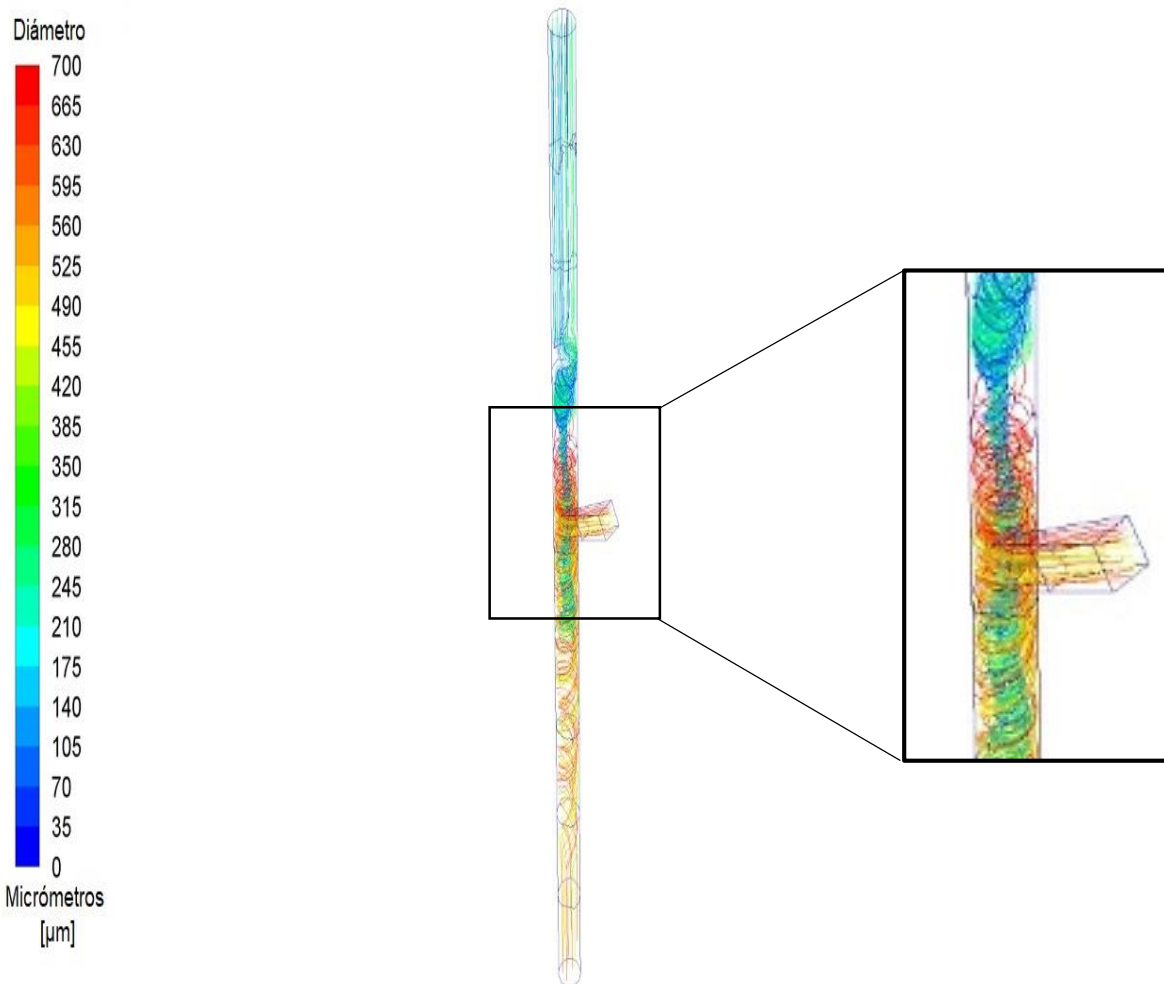
para tamaños de gota promedio de 100, 120 y 140 μm . En este estudio se escogió \bar{d} de 120 μm y un coeficiente de propagación de 2.6 como la distribución de gota en la entrada, en la Figura 23 se presenta la curva de distribución.

Figura 23. Distribución de tamaño de gota para la entrada del fluido



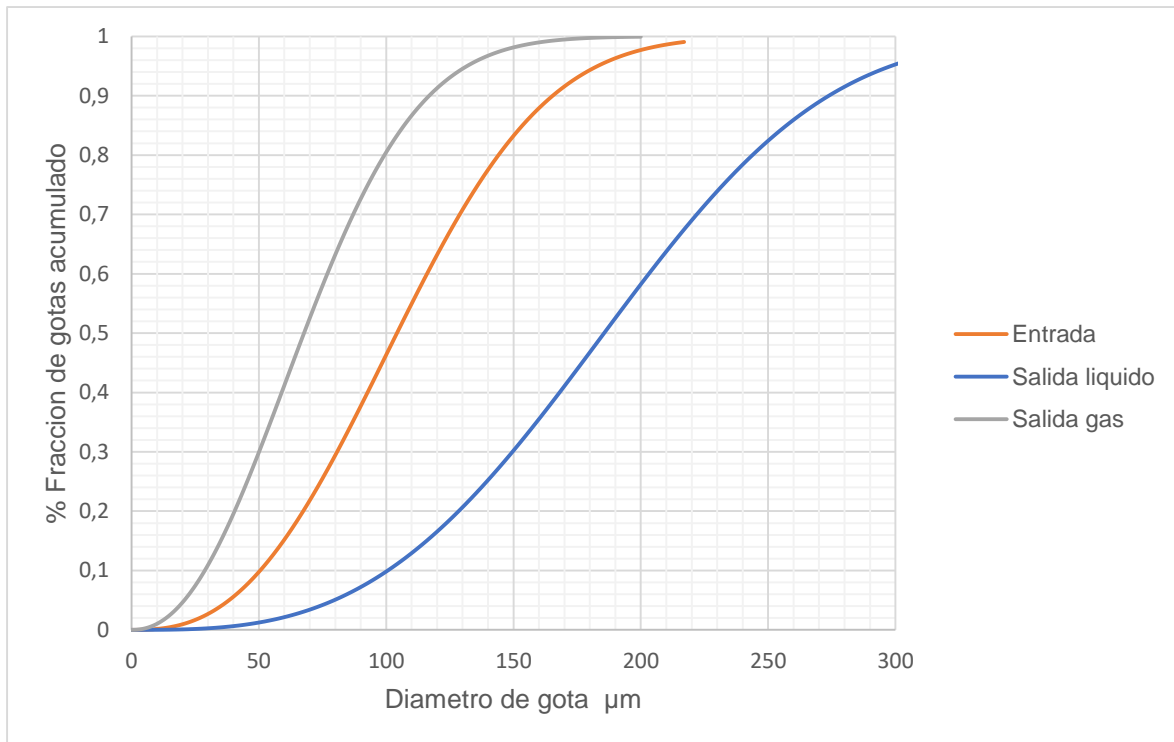
Inicialmente se aplicó una velocidad de 40 ft/s y se obtuvo un seguimiento de gota con contorno de diámetro que se muestra en la Figura 24 en donde se puede detallar el comportamiento de flujo dentro del ciclón, la separación y el flujo de retorno que tiene el gas hacia la salida superior; se observa como las gotas de mayor diámetro se desplazan por la pared del cilindro hacia la parte inferior del separador y las gotas de menor diámetro se arremolinan en el centro del vórtice y ascienden con el flujo de gas para luego salir por la parte superior.

Figura 24. Seguimiento de partícula con contorno de diámetro



Posteriormente se determinó las distribuciones del tamaño de gota en las salidas de gas y líquido. En la Figura 25 se muestra una distribución en la salida de gas con un \bar{d} de 80 μm y en la salida de líquido de 210 μm , se evidencia que el arrastre de partículas mayores a 150 μm hacia la salida superior y la presencia de partículas menores a 50 μm en la salida de líquido son prácticamente nulas.

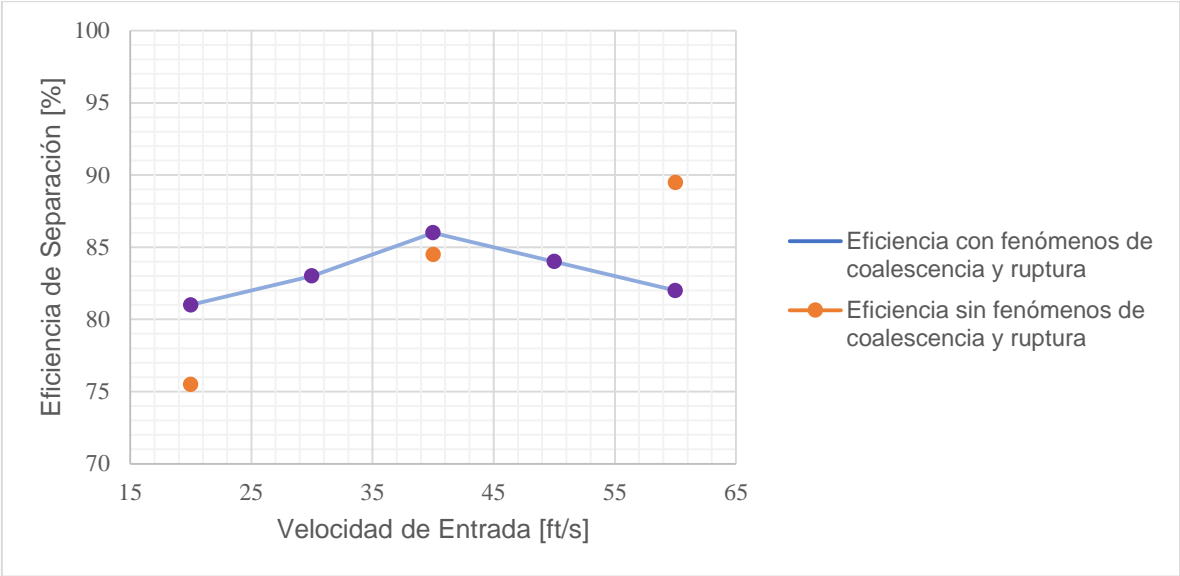
Figura 25. Distribución de tamaño de gota en la entrada y las salidas



Se tomó medidas de la eficiencia de separación a 5 velocidades con fenómenos de coalescencia y ruptura, y se realizó un promedio de las eficiencias obtenidas para cada velocidad sin fenómenos de ruptura ni coalescencia como se muestra en la Figura 26. Comparando estos valores se observa que la eficiencia sube 6,23% a una velocidad de 20 ft/s y 1,3% a una velocidad de 40 ft/s, evidenciándose una tendencia a aumentar la eficiencia al incluir estos fenómenos, pero el aumento en la eficiencia no es constante y disminuye con el aumento de la velocidad, esto se debe a el fenómeno de coalescencia que tiene un mayor efecto que la ruptura de las gotas a bajas velocidades, ya que los gradientes de velocidad son menores y el flujo es menos turbulento, permitiendo que el fenómeno se presente con mayor frecuencia en el choque aleatorio de las gotas; en contraste con la velocidad de 60 ft/s la eficiencia disminuyó un 8%, indicando la mayor influencia del rompimiento de las gotas debido al fenómeno de ruptura que resulta en mayor cantidad de gotas pequeñas que pueden ser arrastradas por el gas hacia la salida superior.

Al analizar el papel que juegan estos fenómenos y la velocidad de entrada en la eficiencia, se observa como la velocidad es un factor clave presente en estos fenómenos y como afecta de manera directa en la eficiencia de separación, ya que por un lado aumenta la fuerza del vórtice y permite una mayor separación debido a la fuerza centrífuga generada, pero por otro lado el aumento de esta velocidad genera mayores gradientes de velocidad y mayor energía en la colisión de las gotas generando una mayor probabilidad de la ruptura de estas gotas y resultando en una pérdida en la eficiencia por arrastre de gas hacia la salida superior, es necesario hacer un balance en estos efectos para así generar un punto de operación con mayor eficiencia de separación.

Figura 26. Medidas de eficiencias con coalescencia y ruptura



7. CONCLUSIONES

En este estudio se realizó un análisis a la eficiencia de un separador GLCC en función del tamaño de gota y velocidad de entrada y se aplicó una distribución de gota para evaluar la eficiencia con fenómenos de coalescencia y ruptura presentes en la separación, para esto se usó como fluido de trabajo un gas natural sintético en la cual por medio del software HYSYS se caracterizó el gas sintético, su fracción de fase líquida y vapor y las condiciones de operación. Se realizaron mediciones de velocidad tangencial y angular en tres posiciones radiales 0,7 , 0.9 , 1,1 m desde la salida inferior del separador, se evidenció la formación del vórtice y el desplazamiento de su eje respecto al eje del cilindro, debido a la uniformidad que se presenta en el campo de flujo por una sola entrada de fluido, se realizó un perfil del vórtice a 3 velocidades 20, 40 y 60 ft/s para ver la influencia de la velocidad en la formación del vórtice, se observó que la parte superior del vórtice se desplaza hacia arriba a medida que aumenta la velocidad generando un choque entre los fluidos de entrada y el vórtice formado, también se evidencio como el filamento de gas o la parte baja del vórtice se define y se alarga hasta la salida de líquido a mayor velocidad.

Se midió la eficiencia del separador en función de 3 tamaños de gota (100, 120 y 140 μm) y en función de tres velocidades de entrada antes mencionadas, para este análisis se omitieron los fenómenos de coalescencia y ruptura; se observó que la eficiencia es directamente proporcional a la velocidad de entrada y al tamaño de gota, registrando como la menor eficiencia a 20 ft/s y 100 μm una eficiencia de 70% y como la mayor eficiencia a 60 ft/s y 140 μm , una eficiencia de 91%. Mediante imágenes de contorno de la concentración másica de las gotas dentro del separador, corroboramos la acumulación de gotas de líquido en las paredes del ciclón y en la parte superior e inferior del cilindro donde la velocidad de gas es menor y los efectos de turbulencia son débiles evitando la dispersión del líquido.

Se aplicó una distribución de gota Rosin-Rammler para el fluido de entrada, se realizó un seguimiento de contorno por diámetro de gota y se calcularon las distribuciones en las salidas de gas y líquido, analizando las distribuciones de gota se evidencia que el arrastre de partículas mayores a $150\ \mu\text{m}$ hacia la salida superior y la presencia de partículas menores a $50\ \mu\text{m}$ en la salida de líquido son prácticamente nulas, lo cual es corroborado con el seguimiento de contorno el cual nos muestra de manera clara la formación del vórtice y el ascenso de las gotas de menor diámetro arrastradas por el gas desde el centro del vórtice.

Para poder estudiar el efecto de la velocidad en los fenómenos de coalescencia y ruptura se calculó y graficó la eficiencia del separador con presencia de estos fenómenos a 5 velocidades (20, 30, 40, 50 y 60 ft/s), en donde a las velocidades más bajas 20, 30 y 40 ft/s se encontró que la eficiencia aumenta en relación con la eficiencia sin ruptura ni coalescencia hasta un 6%, esto es causa de la menor influencia del fenómeno de ruptura a velocidades bajas y mayor influencia de la coalescencia resultando en la unión de las gotas y un mayor facilidad de separar estas gotas, para las velocidades mayores 50 y 60 ft/s la eficiencia comienza a disminuir y se evidencia cuando se compara con la eficiencia obtenida a 60 ft/s sin los fenómenos presentes, el cual disminuye un 8%, dado como resultado a la mayor influencia del fenómeno de ruptura el cual hace lo opuesto a la coalescencia, disminuyendo el tamaño de gota y permitiendo una mayor cantidad de líquido arrastrado por el gas.

Se puede resaltar que el uso de la simulación CFD permite el estudio detallado del comportamiento fluido-dinámico en el separador GLCC, el cual al ser un flujo multifásico con presencia de turbulencia presenta gran complejidad. Estas metodologías de estudio por medio de aproximaciones computacionales son de gran ayuda para poder generar una buena caracterización y acercarse a condiciones de estudio en donde los recursos económicos no hacen viable el estudio con prototipos a escala, ni a condiciones seguras. El presente estudio es una muestra de la práctica y flexible metodología para el

estudio de estos separadores por medio de CFD, dando resultados concretos con las diferentes condiciones de operación y fluidos que se presentan en la industria OGP (*Oil, Gas and Petrochemical*) de gran utilidad para poder considerar el GLCC como una alternativa más económica y compacta para la separación de fases que los equipos convencionales usados actualmente.

8. TRABAJOS FUTUROS

- Realizar un estudio para analizar la eficiencia de un separador con doble o múltiples entradas y su efecto en la fluido-dinámica, formación del vórtice y estabilidad de este a diferentes condiciones de operación y diferentes propiedades de fluidos.
- Simular otras mezclas de gas natural para poder establecer rangos de operación de este tipo de separador en función de las fracciones gas-liquido.
- Generar un estudio más detallado sobre los efectos de coalescencia, ruptura y colisión gota-pared, para un análisis con diámetro de gota menor, con el fin de determinar las condiciones de operación óptimas para una mayor eficiencia en presencia de estos fenómenos.
- Hacer el dimensionamiento del separador con los modelos mecánicos disponibles en la literatura para determinar la geometría más viable a utilizar en un proceso de separación de gas natural a las diferentes condiciones que se trabajan en la industria OGP.

BIBLIOGRAFIA

Angeli, P., & Hewitt, G. F. (2000). Drop size distributions in horizontal oil-water dispersed flows. *Chemical Engineering Science*, 55(16), 3133–3143. [https://doi.org/10.1016/S0009-2509\(99\)00585-0](https://doi.org/10.1016/S0009-2509(99)00585-0)

Arnold, K., & Stewart, M. (2008). *Surface Production Operations* (Third Edit).

Arpandi, I., Joshi, A. R., Shoham, O., Shirazi, S., & Kouba, G. E. (1996). Hydrodynamics of Two-Phase Flow in Gas-Liquid Cylindrical Cyclone Separators. *SPE Journal*, 1(04), 427–436. <https://doi.org/10.2118/30683-pa>

Asaadian, H., Soltani Soulgani, B., Rezaei Gomari, S., & Soltani Soulgani, B. (2018). Experimental Investigation over Effect of Geometrical Changes on Gas/Liquid Cylindrical Cyclone GLCC Separator. <https://doi.org/10.2118/193029-ms>

Beatove, S. L. (2010). Métodos Numéricos y sus Aplicaciones en Diferentes Areas. In IX CONGRESO COLOMBIANO DE METODOS NUMERICOS: Simulación en Ciencias y Aplicaciones.

Bird, R. B., Stewart, W. E., & Lightfoot, E. N. (1964). Fenómenos de transporte. In Fenómenos de transporte.

Boris, M. (2015). Aplicación de cfd-ansys-fluent en el estudio hidrodinámico de tanques de recirculación empleados en acuicultura, 145.

Clark, T. W. I., Isu, G., Gallo, D., Verdonck, P., & Morbiducci, U. (2015). Comparison of symmetric hemodialysis catheters using computational fluid dynamics. *Journal of Vascular and Interventional Radiology*, 26(2), 252-259.e2. <https://doi.org/10.1016/j.jvir.2014.11.004>

Cornejo, J. S., Prieto, N., Gonzalez, G., & Chaves-Guerrero, A. (2019). Numerical Simulation of a Natural Gas Cylindrical Cyclone Separator Using Computational Fluid Dynamics. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, *acs.iecr.9b01217*. <https://doi.org/10.1021/acs.iecr.9b01217>

Ghasemi, A., Shams, M., & Heyhat, M. M. (2016). A numerical scheme for optimizing gas liquid cylindrical cyclone separator. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part E: Journal of Process Mechanical Engineering*, *231(4)*, 836–848. <https://doi.org/10.1177/0954408916644002>

Gomez, L. E., Mohan, R. S., Shoham, O., The, S. P. E., Texaco, J. D. M., Kouba, G. E., Technology, P. (1999). State-of-the-Art Simulator for Field Applications of Gas-Liquid Cylindrical Cyclone Separators. *Spe* 56581.

Higuera, P. (2015). Application of Computational Fluid Dynamics to Wave Action on Structures. Phd. Thesis, 60. Retrieved from <http://www.tesisenred.net/handle/10803/288368>

Hoffmann, A. C., & Stein, L. E. (2007). *Gas Cyclones and Swirl Tubes (Second)*.

Hreiz, R., Gentric, C., & Midoux, N. (2011). Numerical investigation of swirling flow in cylindrical cyclones. *Chemical Engineering Research and Design*, *89(12)*, 2521–2539. <https://doi.org/10.1016/j.cherd.2011.05.001>

Hreiz, R., Gentric, C., Midoux, N., Lainé, R., & Fünfschilling, D. (2014). Hydrodynamics and velocity measurements in gas – liquid swirling flows in cylindrical cyclones &. *Chemical Engineering Research and Design*, (August 2013), 1–16. <https://doi.org/10.1016/j.cherd.2014.02.029>

Hreiz, R., Lainé, R., Wu, J., Lemaitre, C., Gentric, C., & Fünfschilling, D. (2013). On the effect of the nozzle design on the performances of gas-liquid cylindrical

cyclone separators. *International Journal of Multiphase Flow*, 58, 15–26.
<https://doi.org/10.1016/j.ijmultiphaseflow.2013.08.006>

Karabelas, A. J. (1978). Droplet size spectra generated in turbulent pipe flow of dilute liquid/liquid dispersions. *AIChE Journal*, 24(2), 170–180.
<https://doi.org/10.1002/aic.690240203>

Kharoua, N., Khezzar, L., & Saadawi, H. (2013). CFD Modelling of a Horizontal Three-Phase Separator: A Population Balance Approach. 3(4), 101–118.
<https://doi.org/10.5923/j.ajfd.20130304.03>

Launder, B. E., & Spalding, D. B. (1974). THE NUMERICAL COMPUTATION OF TURBULENT FLOWS. *Science*, 3, 269–289.

Mantilla, I., Shirazi, S. A., & Shoham, O. (1999). Flow Field Prediction and Bubble Trajectory Model in Gas-Liquid Cylindrical Cyclone (GLCC) Separators. *Journal of Energy Resources Technology*, 121(1), 9.
<https://doi.org/10.1115/1.2795063>

Marti, S. K., Erdal, F. M., Shoham, O., Shirazi, S. a., & Kouba, G. E. (1996). Analysis of Gas Carry-Under in Gas-Liquid Cylindrical Cyclones. *International Conference on Hydrocyclones*, (January), 1–23. Retrieved from http://tustp.org/publications/analysis_gas_carry_under_96.pdf

Movafaghian, S., Jaua-Marturet, J. A., Mohan, R. S., Shoham, O., & Kouba, G. E. (2000). The effects of geometry, fluid properties and pressure on the hydrodynamics of gas-liquid cylindrical cyclone separators. *International Journal of Multiphase Flow*, 26(6), 999–1018. [https://doi.org/10.1016/S0301-9322\(99\)00076-2](https://doi.org/10.1016/S0301-9322(99)00076-2)

Osorio, J. A., Aredes, M., Zapata, O. L., Damasceno, F. A., & Ciro, H. J. (2012).

Una Revisión Acerca De La Dinamica De Fluidos Computacionales (Cfd) En Instalaciones Avícolas. *Dyna*, 175, 142–149.

Prada, J. (2015). OBTENÇÃO DE CORRELAÇÕES DE NUSSELT EM REATORES DE TANQUE AGITADO ATRAVÉS DA FLUIDODINÂMICA COMPUTACIONAL (CFD).

Shih, T. H., Liou, W. W., Shabbir, A., Yang, Z., & Zhu, J. (1995). A new $k-\epsilon$ eddy viscosity model for high reynolds number turbulent flows. *Computers and Fluids*, 24(3), 227–238. [https://doi.org/10.1016/0045-7930\(94\)00032-T](https://doi.org/10.1016/0045-7930(94)00032-T)

Sun, Z., & Xu, L. (2014). Computational fluid dynamics in coronary artery disease. *Computerized Medical Imaging and Graphics*, 38(8), 651–663. <https://doi.org/10.1016/j.compmedimag.2014.09.002>

Vesilind, A. (1980). The rosin-rammler particle size distribution. 5, 275–277.

Wang, L., Feng, J., Gao, X., & Peng, X. (2017). Investigation on the oil - gas separation efficiency considering oil droplets breakup and collision in a swirling flow. *Chemical Engineering Research and Design*, 117, 394–400. <https://doi.org/10.1016/j.cherd.2016.10.033>