

Revisión del proceso de separación de fases del gas natural a alta presión en la industria Oil&Gas *

Natalia Prieto Jiménez

Grupo de Investigación en Energía y Medio ambiente de la Universidad Industrial de Santander UIS, Bucaramanga - Colombia
natispj@gmail.com  <https://orcid.org/0000-0001-9178-7758>

Germán González Silva

Profesor Asistente, miembro del Grupo de Modelamiento de Procesos de Hidrocarburos; Universidad Industrial de Santander UIS, Bucaramanga - Colombia
germangs@uis.edu.co  <https://orcid.org/0000-0002-4642-1092>

Arlex Chaves Guerrero

Profesor Titular, miembro del Grupo de Investigación en Energía y Medio ambiente de la Universidad Industrial de Santander UIS, Bucaramanga - Colombia
achavesg@uis.edu.co  <https://orcid.org/0000-0003-4481-4818>

RESUMEN

La separación física de líquidos y gases es una de las operaciones de producción, procesamiento y tratamiento en la industria petrolera, necesaria para prevenir daños en equipos rotativos, evitar corrosión en tuberías y cumplir con las especificaciones de calidad del gas natural para uso doméstico. Cuando la presión de operación aumenta, la diferencia de densidades entre las fases disminuye, lo cual dificulta el proceso de separación. Se realiza la revisión del estado del arte, desde los años 90 hasta el presente, de las diferentes metodologías para separar las fases líquida y gaseosa del gas natural, así como las variables de diseño con aplicación a sistemas que operan a alta presión; prestando especial énfasis en los avances encontrados utilizando Dinámica de Fluidos Computacional. Los resultados muestran que, aunque los separadores centrífugos y los separadores supersónicos son más compactos y de fácil mantenimiento comparados con los separadores gravitacionales, éstos últimos continúan siendo la estrategia más favorable cuando se combinan alta presión y baja cantidad de líquido (menos del 4% vol), como es el caso del gas natural. Conclusión adjudicada, en parte, a la falta de estudios experimentales/numéricos que involucren al gas natural en equipos alternativos al separador gravitacional

PALABRAS CLAVE

Separador trifásico, gas natural, asentamiento de gota, diseño, CFD

Review of the natural gas phases separation process at high pressure in the Oil&Gas industry

ABSTRACT

The Physical separation of liquids and gases is one of the main operations of production, processing and treatment in the oil industry; it is necessary to prevent damage to rotating equipment, to avoid corrosion in pipes and to achieve with the natural gas quality specifications for domestic use. When the operating pressure increases, the density difference between the phases decreases, which makes the

Recibido: 20/10/2018 Aceptado: 10/12/2018

* <http://dx.doi.org/10.18041/1900-3803/entramado.1.5433> Este es un artículo Open Access bajo la licencia BY-NC-SA (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>) Publicado por Universidad Libre - Cali, Colombia.

Cómo citar este artículo: PRIETO JIMÉNEZ, Natalia; GONZÁLEZ SILVA, Germán; CHAVES GUERRERO, Arlex. Revisión del proceso de separación de fases del gas natural a alta presión en la industria Oil&Gas. En: Entramado. Enero - Junio, 2019. vol. 15, no. 1, p. 312-329. <http://dx.doi.org/10.18041/1900-3803/entramado.1.5433>



separation process difficult or in some cases impossible. In this work, the state of the art of the different methodologies to separate the liquid and gaseous phases of natural gas is reviewed, as well as the design variables applied to systems that operate at high pressure from the 90's to the present; with special emphasis on the advances found using Computational Fluid Dynamics. The results show that, although both centrifugal and supersonic separators are more compact and easy to maintain compared to gravitational separators, gravitational separators remain the most favorable strategy when combining high pressure and low liquid load (less than 4%vol), as is the case of natural gas. Conclusion awarded, in part, to the lack of experimental/numerical studies involving natural gas in alternative equipment to the gravitational separator.

KEYWORDS

Three-phase separator; natural gas, settling theory, design, CFD

Revisão do processo de separação de fases do gás natural para alta pressão na indústria de Oil&Gas

RESUMO

A separação física de líquidos e gases é uma das principais operações de produção, processamento e tratamento na indústria do petróleo, necessária para evitar danos ao equipamento rotativo, para evitar a corrosão nos tubos e para cumprir as especificações de qualidade do gás natural para uso doméstico. Quando a pressão de operação aumenta, a diferença de densidade entre as fases diminui, o que torna o processo de separação difícil ou, em alguns casos, impossível. Neste trabalho, é realizada a avaliação do estado da arte de diferentes metodologias para separar as fases líquida e gasosa do gás natural e as variáveis de design com aplicação para sistemas que operam a alta pressão a partir dos anos 90 até a data atual; com ênfase especial nos avanços encontrados usando a Dinâmica dos Fluidos Computacional. Os resultados mostram que, embora ambos os separadores centrífugos e supersônicos são mais compactos e de fácil manutenção comparado com separadores gravitacionais, o último continua a ser a estratégia favorecida quando a alta pressão e de baixa quantidade de líquido são combinados (menos de 4% vol), como é o caso do gás natural; Conclusão concedida, em parte, à falta de estudos experimentais/numéricos envolvendo gás natural em equipamentos alternativos ao separador gravitacional

PALAVRAS-CHAVE

Separador trifásico, gás natural, assentamento de gotas, design, CFD

Introducción

Para que el gas natural proveniente de pozo pueda ser incluido por gasoducto a la red de transporte con destino al consumidor final en hogares, vehículos o industrias; éste último debe cumplir con ciertas especificaciones de calidad, que varían de acuerdo con la reglamentación de cada país o región. A fin de cumplir con los estándares de calidad, debe realizarse un pre-tratamiento al gas natural, donde se retiran los hidrocarburos de cadena larga, para evitar la condensación del gas durante el transporte; adicionalmente se retiran o reducen compuestos inorgánicos tales como dióxido de carbono, sulfuro de hidrógeno, nitrógeno, agua y otras impurezas; dichos compuestos son responsables de problemas operativos entre los que se destacan la corrosión en tuberías, acidificación del gas, formación de hidratos y deposición de partículas. El proceso convencional de separación primaria de fases del gas natural se realiza a presiones de operación cercanas a la atmosférica y posteriormente, el gas es recomprimido para su ingreso al sistema de transporte. Esta recompresión genera un alto costo debido a la cantidad considerable de

energía requerida para su funcionamiento; del presupuesto total asignado a los pozos de producción, alrededor del 12% se dirige exclusivamente al sistema de compresión (Creg, 2016). Una alternativa sería realizar la separación de líquidos del gas natural a alta presión; teniendo en cuenta que, dentro del pozo el gas se encuentra a una presión entre 5 -12 MPa y los gasoductos operan entre 7-10 MPa. Estudios experimentales demuestran que la eficiencia de separación gas-líquido es altamente dependiente de la presión de operación dentro del separador debido que, a medida que esta variable aumenta, la diferencia de densidades entre la fase líquida y gaseosa disminuye igual que la tensión superficial, ocasionando la formación de gotas de menor tamaño que son arrastradas por la fase gaseosa lo cual dificulta, o en algunos casos, imposibilita la separación (Austrheim, Gjertsen, y Hoffmann 2008a; Bymaster *et al*, 2011a). Desde hace ya varias décadas, ha sido utilizada la simulación numérica para estudiar fenómenos presentes en procesos de ingeniería, esta técnica permite confirmar, refutar o actualizar los diseños convencionales, sustentados en experiencia de campo o suposiciones que generan sobre-especificaciones en los equipos o fallas en los procesos. La Dinámica de Fluidos Computacional (CFD), combina modelos matemáticos,

condiciones de frontera y métodos de discretización para realizar investigaciones académicas e industriales (González-Silva *et al.*, 2012; Xu *et al.*, 2016; Gharibshahi, Jafari, y Ahmadi, 2019; Pinilla, Meneses-Prado y González-Silva, 2019). En el caso de la separación de fases del gas natural, la simulación numérica ha sido una herramienta útil a la hora de estudiar condiciones de alta presión, costa afuera o a nivel submarino; para las cuales, hacer experimentación resultaría altamente complejo, costoso o peligroso.

Metodología

La revisión bibliográfica fue realizada con base en las publicaciones encontradas en *Scopus*, fueron aplicadas búsquedas por unidad de análisis de palabras clave (*KeyWords Plus KW+*), empezando por búsquedas generales sobre el tema de separación multifase, alcanzando un total de 30000 publicaciones aproximadamente. Para refinar la búsqueda se utilizaron combinaciones de palabras claves usadas en este documento, llegando a una cifra de 131 documentos en el periodo comprendido de 1991 a 2019 como se observa en la Figura 1. La metodología cuantitativa de visualización de los mapas bibliométricos constó de varias etapas: re-

copilación de datos en formato de valores separados por comas (*.csv), selección de unidades de análisis y cálculo de frecuencias de co-ocurrencia y visualización de los resultados en mapas mentales utilizando la herramienta informática *VOSviewer*, de tal manera que se pudiera interpretar la semántica y temática del estudio. A partir de los mapas bibliométricos se seleccionaron las publicaciones más citadas y se complementó con textos fundamentales referentes al tema y que no pertenecían a *Scopus*.

En la Figura 1 se observan claramente tres grupos o *clusters*, el diámetro de circunferencia refleja el peso de las *KW+*, adicionalmente el espectro de los colores muestra la evolución temporal del estudio. Los colores que tienden a rojo evidencian interés actual de la comunidad científica, pudiendo concluir que la eficiencia de separación en conjunto con Dinámica de Fluidos computacional (CFD) son esenciales para entender el proceso y diseño de la separación de fases del gas natural, foco principal del presente estudio, tal como se muestra en la Figura 2.

Vale la pena aclarar que el tema de separación de fases, diseño y la técnica de CFD, son temas transversales entre sí y de importancia en diferentes áreas de la ciencia, tales

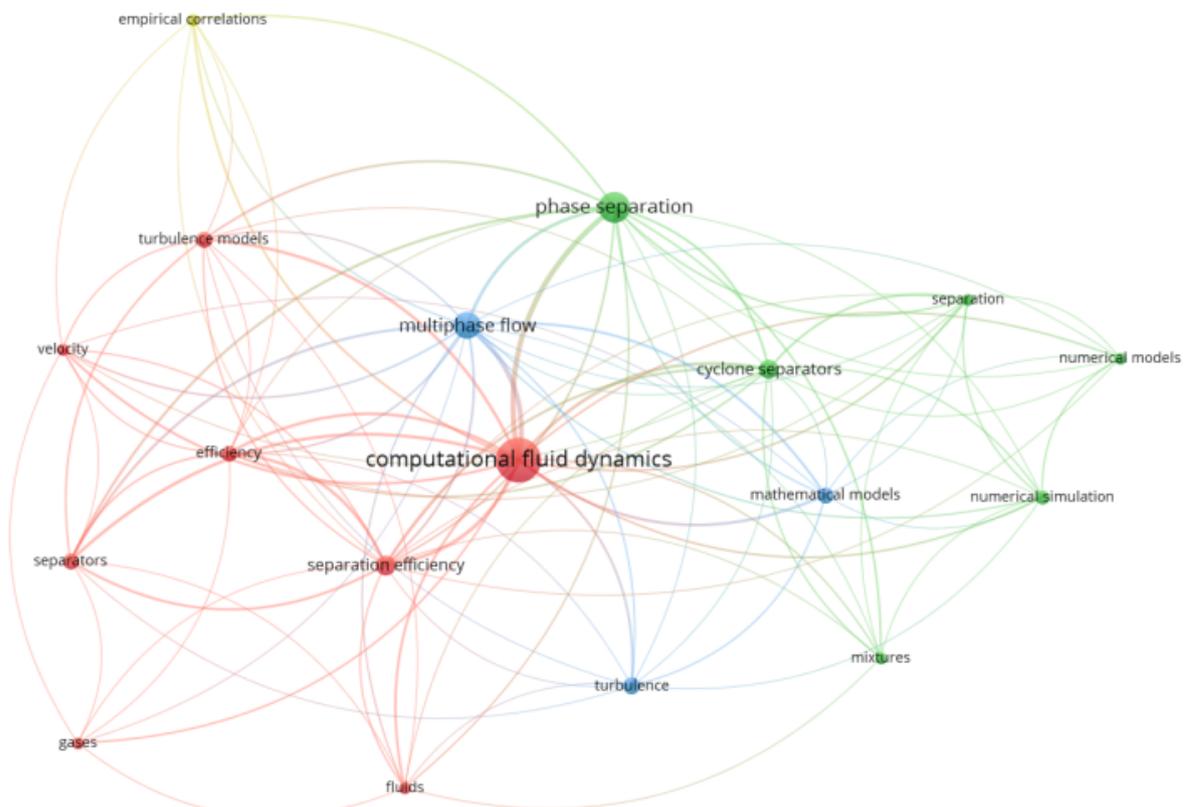


Figura 1. Mapa bibliométrico, búsqueda correspondiente a 131 resultados utilizando metodología *KeyWords Plus (KW+)*
Fuente: Elaboración propia

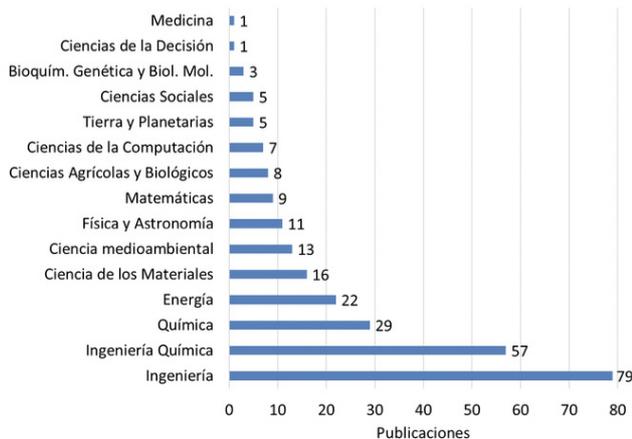


Figura 3. Áreas del conocimiento para la búsqueda correspondiente a 131 resultados en Scopus.
Fuente: Elaboración propia.

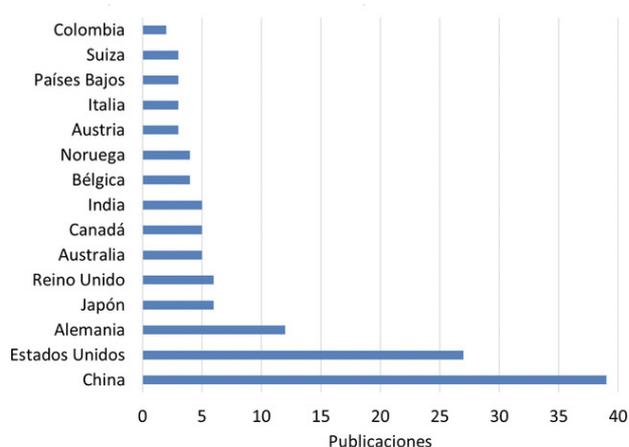


Figura 4. Principales naciones que publican acerca del tema de separación multifase, para la búsqueda correspondiente a 131 resultados en Scopus.
Fuente: Elaboración propia.

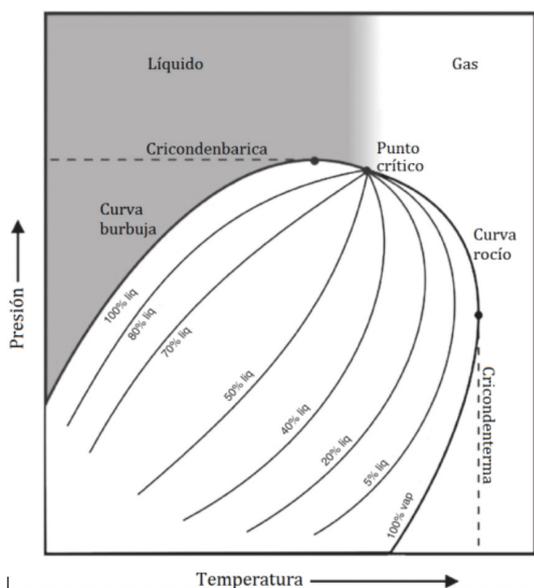


Figura 5. Diagrama Presión vs. Temperatura para diferentes tipos de yacimiento de hidrocarburos.
Fuente: Bahadori, 2014

Durante el diseño de sistemas de separación, la curva de equilibrio termodinámico indica los límites de las variables y las condiciones de operación para las cuales es favorable la separación de fases del gas natural. Cronquist (1979) clasificó los yacimientos de hidrocarburos en cinco categorías (Figura 6): gas seco, gas húmedo, gas condensable, petróleo volátil y petróleo oscuro y pesado.

- **Gas seco:** La temperatura del yacimiento está lejos de la cricondenbaria, la trayectoria temperatura-presión seguida durante la producción no se acerca a la envolvente de fase, dando como resultado un gas libre de líquido.

- **Gas húmedo:** La temperatura del yacimiento se encuentra justo por encima de la cricondenbaria, la trayectoria temperatura-presión seguida durante la producción se acerca un poco a la envolvente, resultando gas con un poco de líquido asociado.
- **Gas condensable:** Normalmente, la temperatura del yacimiento se encuentra entre el punto crítico y la cricondenbaria, el proceso de producción genera una cantidad considerable de hidrocarburos líquidos los cuales pueden ser aprovechados posteriormente.

Separación de fases

La fase líquida es separada del gas natural debido a un variado número de razones, entre las que se destacan: prevenir daños en equipos rotativos (compresores o turbinas), mantener las especificaciones de calidad, prevenir la formación

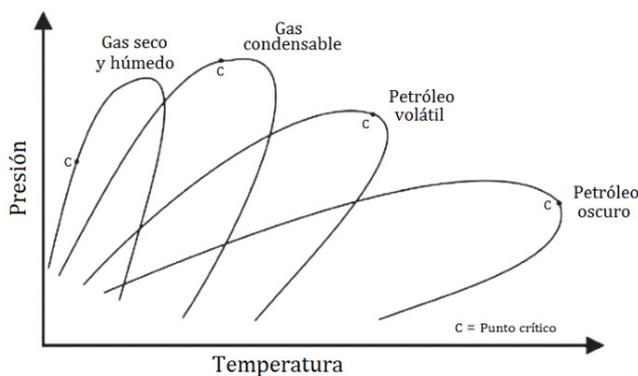


Figura 6. Diagrama de fases Presión vs. Temperatura para un sistema multi-componente.
Fuente: Bahadori, 2014

de hidratos y otras formas de ensuciamiento aguas abajo del separador (Austrheim, Gjertsen, y Hoffmann, 2008b). Los procesos de separación multifase frecuentemente utilizados en las industrias de OGP (*Oil, Gas and Petrochemical*) se basan en la combinación de uno o varios principios de sedimentación por gravedad, impacto y fuerza centrífuga.

Separadores gravitacionales

Existen tres principios físicos fundamentales para la separación de fases en equipos gravitacionales: cantidad de movimiento, sedimentación por gravedad y coalescencia. Los separadores gravitacionales pueden utilizar uno o más de estos principios. La fuerza de cantidad de movimiento se utiliza en el cambio de dirección de flujo a la entrada del separador (por medio de desviadores de flujo o elementos de choque) y por lo general realiza la separación gruesa de las fases líquidas. La fuerza gravitacional se utiliza mediante la reducción de velocidad, permitiendo que las gotas de líquido se depositen en el fondo y el gas suba al tope del separador. Adicionalmente, la segregación gravitacional permite que la fase líquida pesada descienda y la fase líquida liviana ascienda a la superficie. Finalmente, debido a la coalescencia, las gotas más pequeñas (tipo niebla) que no son separadas por gravedad, pueden unirse para formar gotas más grandes y fácilmente sedimentables. Los separadores gravitacionales se clasifican de acuerdo a su geometría como horizontales o verticales; a su función como separadores bifásicos y trifásicos, este último se utiliza cuando el gas natural además de ser rico en hidrocarburos líquidos, contiene agua Figura 7. Adicionalmente, los equipos gravitacionales pueden cla-

sificarse de acuerdo a su presión de operación como separadores de baja (0,07 – 5 MPa), media (2 – 5 MPa) y alta (6 – 12 MPa) presión (Mokhatab, Poe, y Mak 2015).

La literatura especializada, revela pocas publicaciones en el tema de separación multifase que involucre componentes del gas natural a alta presión; los diseños convencionales se realizaban basados en sugerencias de campo y suposiciones de mezclas aire-agua a presión atmosférica; dando como resultado una sobre-especificación de las variables de proceso y equipos de gran tamaño (Abernathy, W. J., 1993). Con el objetivo de eliminar estas fallas surgieron procedimientos más sistemáticos donde, por medio de algoritmos, aplican teoría de asentamiento de gota, para evaluar los requisitos de separación gas-líquido; esta teoría asume gotas perfectamente esféricas asentándose en un fluido continuo, estancado por acción de la fuerza de gravedad. Para la separación líquido-líquido, adoptan la teoría de tiempo de retención, la cual utiliza datos de coalescencia y asentamiento experimental para estimar el tiempo que las diferentes fases deben permanecer dentro del separador para que el proceso se lleve a cabo (Monnery y Svrcek, 2000), adicionalmente, muestran un algoritmo para el dimensionamiento de separadores gravitacionales horizontales y verticales, los cuales han venido siendo actualizados con el fin de utilizar cada vez menos suposiciones y simplificaciones que se alejan de la realidad. Grødal *et al.*, (1999) desarrollaron un paquete de software para el diseño de separadores horizontales bi y tri-fásicos aplicando técnicas de SQP (*Sequential Quadratic Programming*) y utilizando la teoría de asentamiento de gota. Para la solución del problema realizaron la suposición

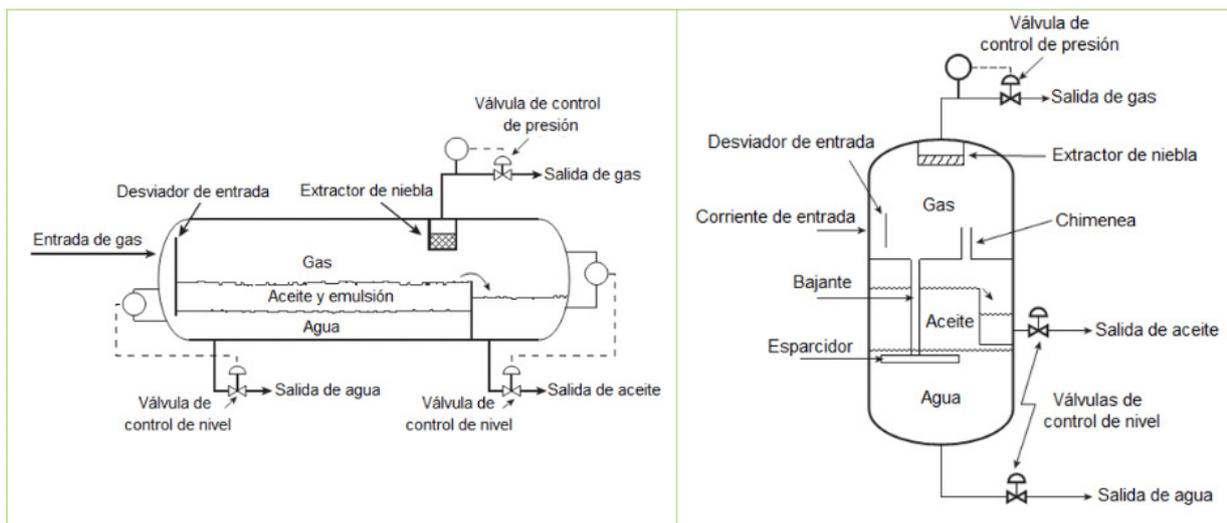


Figura 7. Diagrama esquemático de la configuración típica de los equipos de separación gravitacional: (Izq.) horizontal y (Der.) vertical
Fuente: ExxonMobil, 1999.

de un patrón de flujo tipo pistón, tal como se observa en la Figura 8. Esta suposición no es del todo acertada debido que quebranta la condición de “no deslizamiento” en la pared y en las interfaces; sin embargo, es un buen comienzo para sentar las bases del proceso de separación gravitacional.

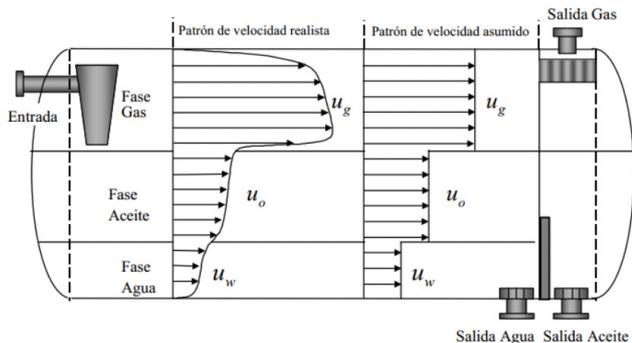


Figura 8. Suposición de flujo pistón utilizado por Grødal *et al.*
Fuente: Grødal y Reaff, 1999

Como consecuencia de la primera suposición, se asume que las gotas de líquido (o burbujas de gas) realizan movimientos lineales; esta segunda suposición puede acercarse a la realidad si se instalan platos perforados dentro del separador horizontal. Con base en estos estudios preliminares y con gran contribución empírica, se desarrollaron las variables de diseño convencional, fundamentadas en la teoría de asentamiento de gota e incluyendo como criterio principal de diseño el factor empírico (K) de Souders y Brown (1934); para el que varios autores (GPSA s/f; Laleh, Svrcek, y Monnery 2012; Svrcek y Monnery 1993) concuerdan en que tanto K como la relación longitud/diámetro (L/D) del separador, son altamente dependientes de la presión de operación (Tabla 1 y Tabla 2).

Tabla 1.

Constante de Souders and Brown Souders y Brown (1934) y su dependencia con la Presión de operación sugerida por Svrcek and Monnery.

Intervalo de Pabs	K [m/s]
6.7 – 101.3	$0.02843 + 1.28 \times 10^{-4} P + 0.01402 \ln(P)$
101.3 – 276	0.1067
276 – 37911	$0.1445 - 0.007 \ln(P)$

Fuente: Svrcek y Monnery, 1993.

Tabla 2.

Relación L/D en función de la presión de operación sugerida por Stanley and Walas (STANLEY y Walas, 1990) para separadores multifase

P [kPa]	0 – 1700	1700 – 3400	>3400
L/D	3	4	5

Fuente: STANLEY y Walas, 1990

Accesorios internos

Accesorios tales como desviadores de entrada, controladores de presión y nivel, distribuidores de flujo (deflectores), eliminadores de niebla, dispositivos de alivio de presión, entre otros, son instalados tanto en separadores horizontales como verticales con el fin de aumentar la eficiencia de separación o tener mejor control del proceso. Algunos ejemplos son:

- Desviadores de entrada:** Su objetivo es mejorar el desempeño del proceso, haciendo la separación gruesa de las fases, minimizando el cizallamiento de las gotas, mejorando las distribuciones de velocidad de cada una de las fases separadas aguas abajo del desviador. La Figura 9 muestra los diferentes tipos de desviadores de entrada. Para sistemas de alta capacidad y exigencia en eficiencia de separación, se recomienda el uso de desviadores tipo placas paralelas (f) o ciclón (g); mientras que los dispositivos más simples se utilizan cuando la eficiencia de separación no es una variable (Arnold y Stewart, 2008; Chin, Stanbridge y Schook, 2002). Los desviadores de entrada normalmente se seleccionan o clasifican según el momento de entrada (o presión dinámica) de la corriente de alimentación del separador; el objetivo es reducir la energía/velocidad de la mezcla de entrada, proporcionando las condiciones favorables para la separación de fases. El momento de entrada se define como $\rho_m V_m^2$, donde ρ_m y V_m son la densidad y velocidad de la mezcla respectivamente. La Tabla 3 presenta los límites típicos de diseño para el momento de entrada de diferentes tipos de desviadores (Bothamley, *et al.*, 2013). La presión dinámica ofrece una luz para seleccionar el dispositivo adecuado a la entrada del separador gravitacional horizontal o vertical.

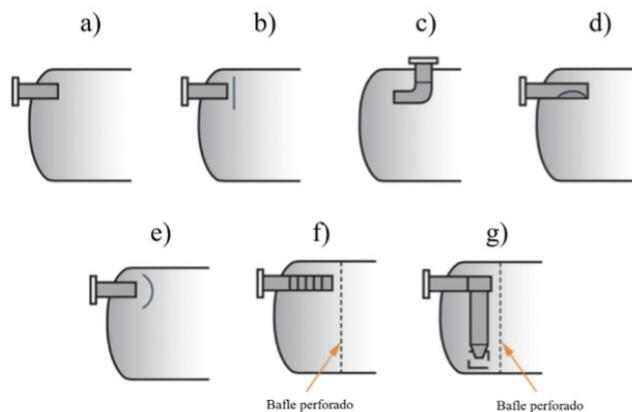


Figura 9. Tipos de desviador de entrada para separadores gravitacionales multifase: a) Sin desviador b) Plato divisor c) Tubo invertido d) Tubo perforado e) Cabeza cóncava f) Placas paralelas (vane) g) Ciclón.

Fuente: Bothamley, *et al.*, 2013.

Tabla 3.

Límite superior del momento de entrada para el diseño de desviadores de entrada

Tipo de desviador	$\rho_m V_m^2$ [lb/ft s ²]
Sin desviador de entrada (a)	700
Plato divisor (c, e)	900
Tubo perforado (d)	1400
Placas paralelas (f)	5400
Ciclón (g)	10000

Fuente: Bothamley, et al, 2013.

- Eliminadores de niebla (*demister*):** Su estructura consiste en una malla de alambre tejido (*wire mesh*, Figura 10-I-II) o una serie de placas (*vane pack*, Figura 10-III-IV); las cuales por medio de mecanismos de impacto, cambio en la dirección de flujo, cambios de velocidad y coalescencia, remueven las gotas más finas de la fase gaseosa. Las mallas se utilizan principalmente para retirar gotas en el intervalo de 10 a 100 μm con la desventaja de tener tendencia al ensuciamiento por lo que su uso se limita a *scrubbers*, o mezclas con contenido de líquido menor al 4%vol. Las placas paralelas utilizan la inercia de las gotas de líquido en la corriente gaseosa para formar una película en la superficie de la placa (Setekleiv, 2012).

Fewel Jr. y Kean (1992) revisaron las principales características de los eliminadores de niebla tipo *vane pack*, tales como eficiencia de separación, caída de presión y capacidad del dispositivo; argumentando que la etapa más importante durante el proceso de diseño es la evaluación de la capacidad de un equipo de separación, debido que la mayoría de los errores se generan durante el escalamiento, es decir, las propiedades físicas medidas en el laboratorio y en el campo de producción son diferentes, por lo tanto, el patrón de flujo de la fase gaseosa y la distribución de tamaño de gota de la fase líquida pueden cambiar también. La conclusión del trabajo fue que los eliminadores de niebla tipo *vane pack* tenían mayor capacidad en comparación con los de tipo *wire mesh*, adicionalmente recomiendan la combinación de medición en campo y simulaciones usando Dinámica de Fluidos Computacional (CFD) para una estimación acertada del comportamiento del *demister*; y lo más importante, con las simulaciones de CFD comprobaron que si excede la velocidad permitida para este tipo de dispositivos, es posible aumentar el número de paletas o adicionar algunos platos perforados con el fin de prevenir el arrastre de gotas hacia la corriente de gas y consecuentemente, aumentar la eficiencia de separación. Brigadeau (2007) desarrolló simulaciones utilizando CFD en un eliminador de niebla, tipo *vane pack* a diferentes presiones de operación, con el fin de analizar la eficiencia del accesorio, así: LP (*Low Pressure*), aire/agua a 1 bar; HPNE (*High Pressure No Entrainment*), gas natural/condensado a 92 bar sin arrastre de gotas y, HPE (*High Pressure Entrainment*), gas natural/condensado a 92

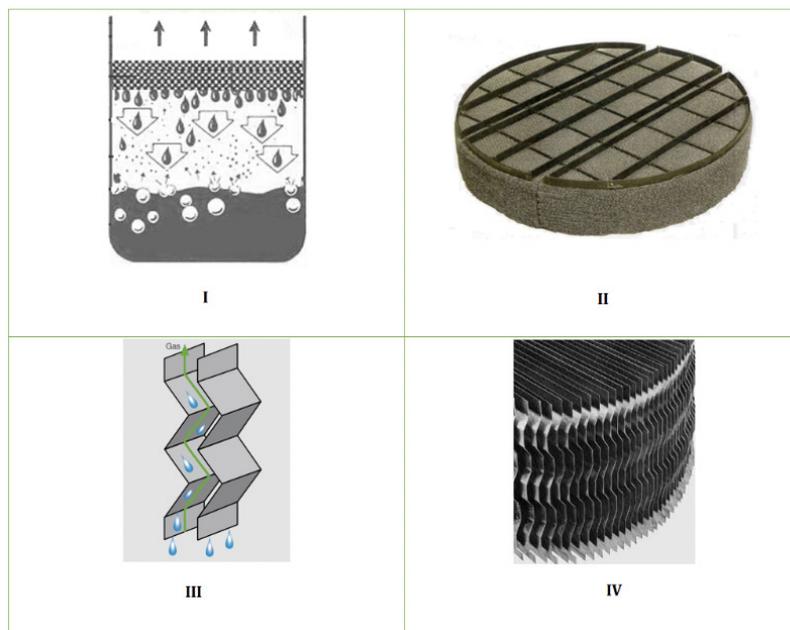


Figura 10. Eliminadores de niebla para separadores multifase. (I), (II) *Wire mesh*. (III), (IV) *Vane pack*

Fuente: Elaboración de los autores. Datos de Sulzer: www.sulzer.com/-/media/files/products/separation-technology/feed-inlet-devices/gas_liquid_separation_technology.ashx

bar con arrastre de gotas. Brigadeau (2007) en su trabajo, concluyó que para el sistema HPE es necesario un mayor nivel de análisis debido al excesivo nivel de líquido arrastrado por la corriente gaseosa a causa de los pequeños tamaños de gota. Setekleiv (2012) analizó ocho diferentes tipos de wire mesh a bajas y altas presiones y un desviador de entrada a 20, 50 y 85 bar para una mezcla de gas natural sintético, sugiere que el diseño de los eliminadores de niebla tipo *wire mesh* debe caracterizarse con un parámetro denominado “*wire packing density*”, también muestra como la velocidad del gas, la tensión superficial afectan, la eficiencia del *demister*, adicionalmente previene acerca de la necesidad de evitar la condición de inundación para no tener disminución en la eficiencia de separación.

- Ciclones de flujo axial:** Los dispositivos AFC (*Axial Flow Cyclone*) constan de una configuración cilíndrica, tal como se observa en la Figura 7. El flujo a través de esta tubería es puesto en rotación gracias a un “generador de remolino” (*swirl generator*), el cual consiste en una geometría cilíndrica con una serie de paletas instaladas que otorgan un componente tangencial al flujo axial. Aguas abajo del generador de remolinos, en la sección de asentamiento o separación; la rotación del flujo obliga a las gotas a moverse a la pared exterior, donde se eliminan a través de rendijas o anillos anulares (Swanborn, 1988). Desde la época de los 90’s se han venido publicando en la literatura diferentes esquemas para los AFC (Burkholz, 1989; Verlaan, 1991; Nieuwstadt, 1995; Hoffman, 2002). El más reciente se denomina diseño *Sheffield*; las dimensiones y principales características se muestran en la Figura 11.

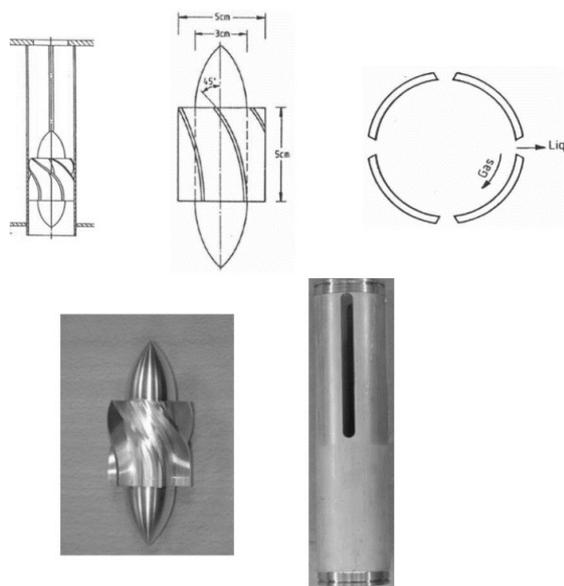


Figura 11. Esquema de los ciclones de flujo axial usados como accesorios en separadores gravitacionales industriales.

Fuente: Austrheim *et al*, 2008.

Separadores tipo ciclón

Los separadores tipo ciclón utilizan fuerza centrífuga para separar componentes de distintas fases y densidades, la fuerza que actúa sobre las gotas de líquido es cinco veces mayor que la gravedad en equipos grandes, a bajas velocidades y hasta 2000 veces en equipos pequeños a alta presión. El separador ciclónico es reconocido y aceptado en variedad de aplicaciones, desde condensado de vapor hasta polvos de hornos (Cao y Bian, 2019; Shuyan Wang *et al*, 2019; Wasilewski y Brar, 2019). En este equipo, el gas portador y las gotas en suspensión entran tangencialmente en una sección cilíndrica o cónica del separador, tal como se observa en la Figura 12. Posteriormente, la mezcla forma un espiral hacia abajo, forzando la materia en suspensión más pesada contra las paredes. Las gotas de condensado humedecen la pared, formando una película descendente, la cual se retira por la parte inferior (Bahadori, 2014).

Movafaghian *et al*. (2000), estudiaron experimentalmente el comportamiento hidrodinámico de los separadores GLCC (*Gas-Liquid Cylindrical Cyclone*) utilizando mezclas aire-agua para 3 geometrías, 4 viscosidades de líquido, 3 presiones de operación (101,3 - 273,6 - 487,2 kPa) y el uso de un surfactante. A pesar que los estudios no superan los 5 MPa, se comprobó que a medida que aumenta la presión de operación dentro del sistema, la densidad del gas aumenta, incrementando el arrastre de líquido por la corriente gaseosa. Shoubo Wang *et al*, 2003 realizaron estudios experimentales junto con la implementación del modelo mecánico desarrollado por Gomez *et al*, 2000, el cual es dependiente del patrón de flujo (anular y de niebla),

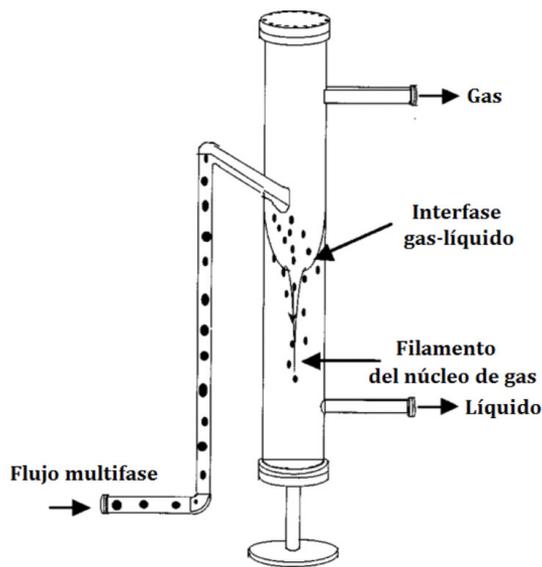


Figura 12. Diagrama esquemático del separador ciclónico gas-líquido

Fuente: Erdal y Shirazi, 2004

donde el arrastre de líquido se calcula por la correlación de Wallis (1969) para el análisis de la separación por GLCC de gases húmedos a bajas presiones; con base en los resultados encontrados para mezclas aire-agua, se halló una forma interesante de abordar el problema de separación de mezclas de gas natural ricas en hidrocarburos líquidos; recomendando realizar algunas modificaciones al equipo original: adicionar un AFE (*Annular Film Extractor*) y una tubería de regreso de líquido para drenar el efluente de la AFE con el fin de aumentar la eficiencia de separación. Elsayed y Lacor (2012) con la ayuda de redes neuronales de tipo RBF (*Radial Basis Function*) realizaron el modelado y optimización pareto de ciclones cónicos, obteniendo resultados satisfactorios si se quisiera optar por una alternativa al ya recomendado GLCC para gas natural. En el caso de las separación gas-condensado-agua, Yu *et al.* (2013), patentaron un modelo de separador equipado con una cámara cilíndrica encajada en un ciclón de doble cono, con una entrada tangencial rectangular y una salida coaxial. Zhang *et al.* (2014), realizaron una actualización a la patente de Yu *et al.* (2013), en donde se separan las dos fases líquidas (condensado y agua) y salen por boquillas diferentes del ciclón (Figura 13).

Dificultades operativas

Los factores más comunes que pueden reducir el desempeño de un separador gas-líquido son: falla en el control de nivel del líquido, diseño deficiente, daño en los accesorios internos, fluidos espumosos, formación de vórtices en las

corrientes de salida de líquido, obstrucción de líquido a la salida y exceso en la capacidad diseñada del equipo (Arnold y Stewart, 2008). Existen diferentes estrategias para ayudar a solucionar dichos inconvenientes (Blezard, R. G. *et al.*, 2000): incrementar el tamaño de gota de la fase dispersa (promoviendo la coalescencia); inducir aceleración sobre las gotas (usando fuerza centrífuga); aumentar la diferencia de densidades entre los fluidos (adicionando diluyentes) o disminuir la viscosidad de la fase líquida (calentando). Por otro lado, la presión de operación es una variable importante en el proceso de separación de fases debido que al aumentarla, la diferencia de densidades entre las fases líquida y gaseosa disminuye así como la tensión superficial, esto hace que las gotas de líquido que se forman sean más pequeñas y por ende la cantidad de líquido arrastrado en la corriente gaseosa aumenta (Luijten, 1998).

Formación de gota y coalescencia

En sistemas de separación gravitacional gas-líquido, a medida que se eleva la presión de operación dentro del separador, las gotas que se forman son mucho más pequeñas y por lo tanto, la tendencia a ser arrastradas por la corriente gaseosa es mayor; si se compara con procesos a baja presión (Laleh, Svrcek, y Monnery 2012. Una manera efectiva de contrarrestar el efecto de arrastre es promoviendo una mejora en la coalescencia, la cual se define como la propiedad que tienen dos o más gotas de unirse (generalmente por efecto de choque) para formar una gota de mayor tamaño (Figura 14).

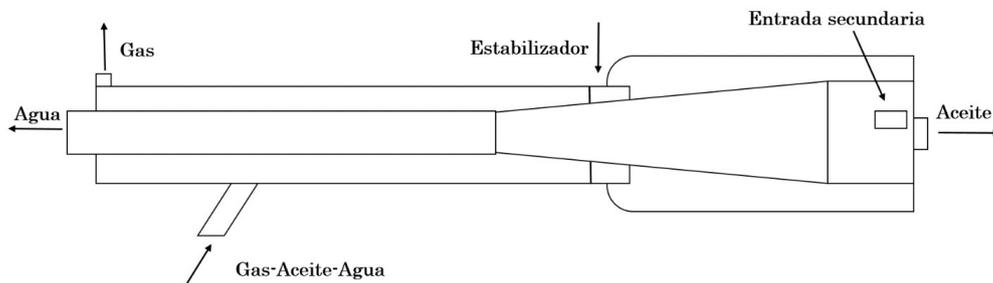


Figura 13. Características geométricas del ciclón diseñado por Zhang *et al.* (2014).
Fuente: Zhang *et al.* (2014)

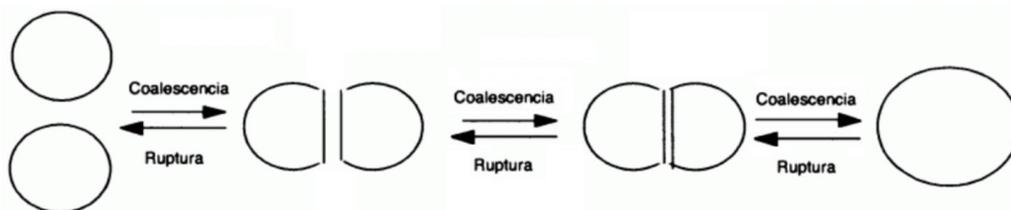


Figura 14. Diagrama esquemático del proceso de coalescencia y ruptura.
Fuente: Elaboración de los autores

Para entender el efecto que tiene la coalescencia sobre el proceso de separación de fases del gas natural, es importante conocer los mecanismos de nacimiento y formación de cada gota. Para que una gota se genere a ciertas condiciones termodinámicas, debe pasar por tres etapas fundamentales:

I. Supersaturación: Se define como un estado de no-equilibrio o estado metaestable en una mezcla gas-líquido, es decir, el gas tendría en ese instante más moléculas por unidad de volumen que las que debería tener en el equilibrio a esas condiciones de presión y temperatura. Este estado metaestable genera, por lo tanto, una formación espontánea (debido a fluctuaciones térmicas) de “embriones” de fase líquida (Vitaly Kalikmanov *et al.*, 2007).

II. Nucleación: Estos embriones, resultado de la aglomeración de moléculas, forman *clusters* de diferentes formas, y tamaños del orden de nanómetros (V. I. Kalikmanov, 2013).

III. Crecimiento de gota: Una vez formado el núcleo, el número de moléculas aumenta y la gota crece hasta alcanzar el equilibrio, pasando de un tamaño del orden de nanómetros al orden de micrómetros (Pathak, 2013). El número de Knudsen (Kn), definido como la relación entre la trayectoria libre de una molécula de vapor (radio de movimiento) y el diámetro de la gota, determina los diferentes regímenes sobre los cuales se presentará el crecimiento. Si $Kn < 1$ hay poca libertad de movimiento de las moléculas (alta presión) y el crecimiento es controlado por la difusión; mientras que si $Kn > 1$ hay más espacio disponible para el movimiento de las moléculas y el crecimiento es controlado por la cinética (Lebon, Jou, y Casas-Vázquez, 2008).

Para la transición de moléculas de fase gaseosa a fase líquida existen en la literatura cuatro teorías fundamentales desarrolladas: La primera, “Teoría de Nucleación Clásica – TNC”, desarrollada inicialmente por Lord Kelvin y Gibbs (1914) hace un siglo, supone que los núcleos formados son completamente esféricos y que las propiedades asociadas son macroscópicas. Funciona bien para sustancias puras y bajo número de moléculas (Merikanto, 2007). Se destacan los trabajos de Katz and Wiedersich (1977), Girshick and Chiu (1990) y Wilemski (1995). La segunda es la “Teoría Semi-Fenomenológica – TSF” y sustenta que la principal desventaja de la TNC es considerar las propiedades macroscópicas y utilizan la termodinámica estadística para el cálculo de propiedades (Ford, Laaksonen, y Kulmala, 1993; VI Kalikmanov, Wölk, y Kraska, 2008). Kalikmanov *et al.* (2007), utilizaron esta teoría en la separación de gas natural con resultados poco satisfactorios. La tercera es la “Teoría de

Densidad Funcional - TDF”, la cual considera la gota como un fluido no homogéneo con perfil de densidad que varía desde el centro de la gota hasta un punto lejano en la fase gaseosa (Napari 2000; Oxtoby y Kashchiev, 1994). La más reciente se basa en “Simulación Molecular – SM”, donde las interacciones entre átomos o moléculas se analizan mediante modelos potenciales que determinan las interacciones utilizando métodos como el de Montecarlo o dinámica molecular (Chen *et al.* 2002; Frenkel y Smit 2002).

El producto final del proceso de nucleación es un tamaño inicial de gota, que sería la información de entrada para calcular el perfil de crecimiento de gota en función de Kn . Se recomienda utilizar el modelo de Young (Young 1991) cuando $Kn < 1$ y el modelo de Gyarmathy (1982) cuando $Kn > 1$. Teniendo un tamaño de gota en equilibrio, es posible simular numéricamente la coalescencia por medio de balances de población, PB (*Population Balance*) donde el sistema se divide en “poblaciones” de gotas dentro de un entorno continuo. Una población se describe como la densidad de una variable extensiva (número, masa o volumen de gotas). Kharoua, Khezzer, y Saadawi (2013), realizaron la simulación utilizando CFD del proceso de separación de las fases de gas natural utilizando el modelo de balance poblacional para el análisis del comportamiento de las gotas de líquido dentro de un separador ya existente en Abu Dhabi, argumentando que el modelo multifase Euleriano que utiliza el software comercial ANSYS-FLUENT asume las fases secundarias (aceite-agua) como mono-dispersas y por lo tanto excluye del análisis los fenómenos de coalescencia y ruptura; también argumentan que a falta de información de campo acerca de la distribución de tamaño de gota a la entrada del separador, utilizaron 3 distribuciones de tamaño de gota para cada fase discreta (aceite-agua), denominadas distribución fina, media y gruesa (Figura 15).

Para el cálculo de las 6 distribuciones utilizaron la función de Rosin (1933):

$$Y_d = e^{-(d/\bar{d})^n} \quad (1)$$

Donde Y_d es la fracción másica o volumétrica de las gotas cuyo diámetro es mayor a d , n es un parámetro de propagación y \bar{d} se calcula en función del diámetro medio de Sauter (d_{32}). La distribución que utilizan es conservadora, teniendo en cuenta que Hansen and Rortveit (2006) y Laleh *et al.* (2012), utilizan diámetros mínimos de gota de aceite de 75 y 100 μm respectivamente.

Simulación numérica

Existen diferentes procedimientos para dar solución a los modelos matemáticos presentes en problemas de ingeniería: la solución analítica y la solución numérica, ambos

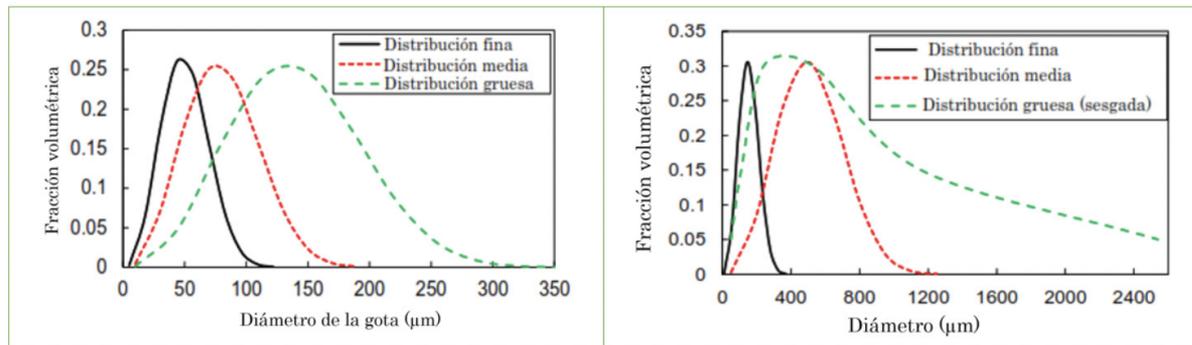


Figura 15. Distribución de tamaño de gota para aceite (izq.) y para agua (der.), con base en la función de Rosin-Rammler.
Fuente: Kharoua, Khezzer, y Saadawi (2013)

procedimientos tienen como objetivo resolver el sistema de ecuaciones que define el fenómeno físico del sistema. Las soluciones analíticas arrojan resultados exactos, sin embargo, tienen la desventaja de que su aplicación se limita a geometrías sencillas y condiciones de frontera simples. La simulación numérica, prácticamente no presenta restricciones, siendo capaz de resolver problemas con geometrías y condiciones de frontera complejas, generando resultados que se aproximan muy bien a la realidad con relativa rapidez (Maliska, 2017).

Dinámica de Fluidos Computacional (CFD)

CFD es una técnica de la dinámica de fluidos, en la cual se utilizan métodos numéricos, principios de conservación y ecuaciones de transporte, junto con modelos especializados de cierre y adecuadas condiciones de frontera para dar solución a los problemas que involucren flujo de fluidos. Actualmente se encuentran disponibles softwares comerciales y de código abierto; estos últimos tienen la facilidad de ser utilizados sin ningún costo. Sin embargo, no todos cuentan con la robustez y el respaldo que ofrece el software (Jeong y Seong, 2014; MacKenzie *et al.*, 2015) comercial. Adicionalmente, el continuo lanzamiento de computadoras de alto rendimiento, permite generar avances en la investigación con CFD diferentes campos, tal como flujo multifásico (Gonzalez, 2008; González, Jiménez y Salazar, 2012; Silva, Prieto y Mercado, 2018). El uso de herramientas de CFD durante el desarrollo de investigación científica es especialmente útil cuando por razones de seguridad o costos, no es posible reproducir las condiciones de un proceso en particular, por ejemplo, velocidades supersónicas, altas presiones, profundidad oceánica, entre otras.

Las primeras investigaciones relacionadas con la solución de problemas de separación gas-líquido utilizando CFD fueron desarrolladas por Hansen *et al.* (1991), los cuales introdujeron el código FLOSS (*Flow Simulator for Separators*) que simula el comportamiento alternado de mezclas agua-aire-nafta dentro de separadores multifase utilizando dos mo-

delos: el modelo “*Two-Fluid*” para la separación gas-líquido en la zona de entrada al separador y el modelo “*Drift-Flux*” para la separación de gotas de agua o aceite dispersas en las fases líquidas; todas las simulaciones realizadas fueron bifásicas. Para validar los modelos, realizaron experimentos con un separador cúbico transparente (0.46x0.46x1.83 m) provisto de un desviador de flujo esférico a la entrada y un plato perforado para la distribución de flujo en la zona gravitacional; los experimentos mostraron que los fluidos en la zona de separación gravitacional seguían un patrón de flujo tipo pistón. Posteriormente, con el código FLOSS se realizó la simulación de un separador trifásico de escala industrial, las simulaciones dieron como resultado la instalación de un separador de 3.3 m de diámetro y 16.3 m de altura en la plataforma costa afuera Gullfaks-A de Noruega (Hansen *et al.*, 1993; Morrow, 1991; Pourahmadi Laleh, Svrcek y Monnery, 2012); este equipo estaba equipado con un desviador de entrada esférico, deflectores y eliminadores de niebla para mejorar la separación de gotas pequeñas. Durante los primeros cuatro años de operación, este separador presentó problemas relacionados con la formación de emulsiones y control del nivel de agua, por lo que fue pertinente proponer modificaciones al diseño original a fin de intentar resolverlos (Hansen, 2001; E.W. Hansen, Celius, y Hafskjold, 1995).

En Wilkinson *et al.* (1994), usaron dos separadores horizontales transparentes de escala piloto, uno bifásico y el otro trifásico, para realizar ensayos experimentales y simulaciones numéricas con el fin de estudiar el patrón de flujo durante la separación de la mezcla petróleo-agua. Utilizaron LDA (*Laser Doppler Anemometry*) y PDA (*Phase Doppler Analysis*) para medir la velocidad del fluido y la distribución de tamaño de partícula. Las simulaciones fueron realizadas usando el modelo DPM (*Discrete Phase Model*) de ANSYS-Fluent y la condición de simetría axial, por lo que solo simularon la mitad del dominio de solución; esto pudo haber generado discrepancias significativas en el número de gotas presentes en el sistema, con respecto a los datos experimentales, se atribuye las discrepancias a la falta de capa-

cidad de computo de la época. Seis años después, con los mismos separadores desarrollaron nuevas simulaciones en el software PHOENICS y hardware sofisticado; encontrando que era posible maximizar la uniformidad del flujo si se mejora el área disponible del deflector; debido que las mejores condiciones de separación de la mezcla petróleo-agua se alcanzan cuando el flujo se acerca al tipo “flujo pistón” (Wilkinson *et al*, 2000).

Hallanger *et al.* (1996), desarrollaron la simulación con CFD de un separador horizontal trifásico utilizando el modelo de dos fluidos, las fases fueron gas libre, petróleo con trazas de agua y agua libre. Las gotas de agua dispersas en el petróleo se asumieron como partículas esféricas que obedecen la ley de arrastre para partículas sólidas. Para la fase aceitosa aplicaron el modelo de mezcla y fueron despreciadas las interacciones entre fases dispersas (coalescencia y ruptura). El equipo fue provisto de un deflector, dos platos perforados, un eliminador de niebla y un vertedero de gotas. el tiempo de residencia de las fases presentes dentro del separador debe ser suficiente (por lo menos 130 seg.) para que la segregación gravitacional haga efecto, es decir, que las gotas de agua descendan al fondo del separador y las gotas de aceite presentes en el agua asciendan a la superficie.

Frankiewicz *et al.* (2001), analizaron los efectos de algunos aspectos de diseño sobre el proceso de separación. Las simulaciones fueron desarrolladas para un separador petróleo-agua con y sin distribuidores de flujo, mostrando la sensibilidad que tiene la instalación de accesorios sobre la separación bifásica. Posteriormente realizaron estudios con CFD acerca del patrón de flujo de separadores bi y trifásicos en plataformas fijas y flotantes de campos petroleros; analizaron la configuración de diferentes tipos de internos en estado estable y transitorio (Frankiewicz y Lee 2002). la introducción de platos perforados a los separadores ayuda a la estabilización del flujo, reduciendo el “chapoteo” de líquido en plataformas costa afuera; sin embargo, ninguna de las simulaciones realizadas tuvieron en cuenta los fenómenos de ruptura y coalescencia debido que utilizan el modelo VOF de FLUENT, considerado modelo homogéneo (Rezende 2013). Otros estudios muestran diferentes configuraciones de internos con el fin de reducir al máximo, problemas asociados al chapoteo de líquido (Lee *et al*, 2004; Lee, Khan, y Phelps 2009; Lu *et al*, 2007).

Swartzendruber *et al.* (2005), modelaron un separador bifásico vertical usando Fluent; el separador estaba equipado con un deflector y un demister, con el propósito de mitigar la distribución de flujo no uniforme en el demister, realizaron los siguientes cambios: el deflector fue movido de la entrada e instalado paralelo al demister y se instaló un codo de 90° con paletas giratorias entre la entrada y el deflector. Newton *et al.* (2007), presentan la descripción,

ventajas y limitaciones de dos herramientas para el análisis de separación multifase: CFD y VDM (*Visual Dynamic Modeling*). En ambos casos, utilizaron la ecuación de Rosin (1933) para definir la distribución del tamaño y estimar el máximo tamaño de gota estable. Para desarrollar las simulaciones recomiendan el uso de un abordaje Euleriano para resolver el sistema de ecuaciones; siendo conscientes de la complejidad del presente abordaje y de las limitaciones computacionales, decidieron dividir el volumen del separador en secciones independientes, cada una de las cuales incluye una sola fase continua y una dispersa, las interfaces gas-líquido y líquido-líquido las asumen como paredes sin fricción que atrapan las gotas que entren en contacto con ellas, por lo tanto suponen que las gotas se eliminan del espacio computacional después de alcanzar estas interfaces. Este tipo de suposiciones podrían generar resultados poco confiables, debido que puede mezclarse la información al pasar por la interfase.

Erdal y Shirazi (2004), realizaron mediciones experimentales del patrón de flujo en separadores ciclónicos utilizando la técnica de *Laser Doppler Velocimeter* (LDV), posteriormente realizó simulaciones con CFD aplicando los modelos de turbulencia κ - ϵ y RSM (*Reynolds Stress Model*); para ambos modelos de turbulencia utilizaron inicialmente un esquema híbrido de discretización y posteriormente fueron aumentando la precisión con esquemas *Upwind* de segundo orden y QUICK (Quadratic Upstream Interpolation for Convective Kinematics). El autor concluye que al aplicar esquemas de discretización de orden alto al modelo RSM se generó inestabilidad en la convergencia y que el modelo κ - ϵ representó mejor las características del proceso. Posteriormente se mediría también el flujo de remolino y los núcleos que se forman dentro del ciclón (Hreiz *et al*, 2014; Hreiz, Gentric y Midoux, 2011), utilizando la combinación experimental-simulación, solo que esta vez con técnicas de PIV (*Particle Image Velocimeter*). Los resultados proponen el uso de múltiples entradas tangenciales para generar el movimiento de remolino en el ciclón, lo que suponen que favorece el régimen de inversión de flujo doble, y por lo tanto, mejora la eficiencia de separación; sin embargo, hace falta realizar más estudios. Han *et al.* (2013), propusieron una sencilla pero interesante modificación a la configuración convencional del ciclón (Figura 12), con el fin de analizar el efecto de la geometría y las condiciones de operación sobre la velocidad y eficiencia de separación. La Figura 16 corresponde a la nueva geometría propuesta, con la cual utilizaron el enfoque Euleriano y el modelo de turbulencia RSM para las simulaciones numéricas con CFD. El los autores modelo RSM predice adecuadamente el patrón de flujo tipo remolino, la velocidad axial, velocidad tangencial y caída de presión en simulaciones con ciclones. A partir de los estudios con CFD, se se determina que el diámetro de entrada de la mezcla y el diámetro del separador son los

parámetros que influyen en la calidad de la salida del gas y la caída de presión.

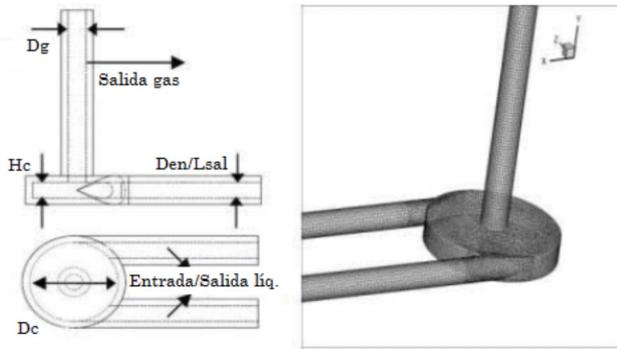


Figura 16. Geometría del separador ciclónico propuesto por Han *et al.* (2013). Fuente: Han *et al.* (2013).

Austrheim *et al.* (2008) desarrollaron un análisis experimental del desempeño de la separación gas-líquido, operando a bajas y altas presiones, fueron utilizados tres separadores gravitacionales verticales de escala piloto operando a diferentes presiones:

- II. Un separador de 0.39 m de diámetro operando a temperatura ambiente y presiones bajas (entre 200 y 650 kPa). El sistema multifase estaba compuesto por la mezcla Exxsol D60 con viscosidad alrededor de 1.4 mPa.s; agua y aire.
- II. Un separador pequeño de 0.15 m de diámetro operando a temperatura ambiente y presiones altas (entre 2000 a 9200 kPa). El sistema involucró una mezcla bifásica compuesta de Exxsol D60 con viscosidad alrededor de 1.4 mPa.s y nitrógeno; y en algunos casos gas natural sintético que contenía metano, etano y pentano.
- II. Un separador grande de 0.84 m de diámetro operando a temperatura ambiente y presiones altas (entre 2800 a 11300 kPa); el sistema estaba formado por una mezcla bifásica proveniente de plantas de procesamiento de gas natural en Noruega.

Los resultados experimentales muestran un buen desempeño de los separadores en la región no inundada del demister. Además, fue determinada la distribución del tamaño de gota en un separador a alta presión, llegando a la conclusión que el máximo tamaño de gota se encuentra alrededor de 400 μm y el mínimo entre 1-10 μm . En el tercer separador se presentaron inconvenientes principalmente por arrastre de líquido y por el pequeñísimo tamaño de las gotas. Con base los trabajos experimentales de Austrheim *et al.* (2008)

y Bymaster *et al.* (2011), desarrollaron nuevos estudios junto con la empresa FMC Technologies acerca del desempeño de separadores gravitacionales y centrífugos de gas natural a presiones que van desde 1500 psig (10.3 MPa) hasta 2600 psig (18 MPa), encontrando principalmente perfiles de eficiencia de separación en función de la cantidad del líquido a la entrada para diferentes configuraciones y condiciones de operación. De acuerdo con los resultados experimentales, se observa que existe una preocupación por los riesgos asociados a la separación de fases a alta presión, tanto en equipos gravitacionales como centrífugos; entre los riesgos se destacan las pequeñas distribuciones de tamaño de gota, el aumento del porcentaje de arrastre y/o inestabilidad de la película de líquido y el hecho de que una disminución en la diferencia de densidades de las fases hace que la separación se dificulte.

Laleh (2012) realizaron la simulación en Fluent de tres separadores gravitacionales bifásicos de escala piloto y un separador trifásico de escala industrial (Gullfaks-A), utilizando la combinación de modelos VOF (*Volume of Fluid*) para el comportamiento y patrones de flujo en la fase continua, el modelo DPM (*Discrete Phase Model*) para analizar el movimiento de las gotas dentro de cada separador y la ecuación cúbica de estado de Peng-Robinson para calcular las propiedades de los fluidos, extraídas del software HYSYS. El sistema contiene gas natural saturado proveniente de la literatura a tres condiciones de presión: 70 kPa, 700 kPa y 2760 kPa. Para la distribución del tamaño de gota fue utilizada la ecuación desarrollada por Rosin (1933), donde afirma que los parámetros que más afectan el tamaño de la gota son la densidad del gas y la viscosidad del condensado; y que, contrario a las estrategias clásicas de diseño, los resultados con CFD muestran que se necesitan tiempos de residencia adicionales para que las gotas de la fase discreta atraviesen las interfaces.

Conclusión

La implementación de técnicas de indicadores bibliométricos facilitó la búsqueda de la información relevante sobre el tema estudiado, adicionalmente los mapas mentales y en especial la clasificación por factores de impacto y citación, suministró orientación certera en las diferentes metodologías utilizadas en la industria de *Oil&Gas* para el proceso de separación de fases del gas natural a alta presión en el presente trabajo. Tales metodologías son: separación gravitacional, separación centrífuga y separación supersónica; las dos últimas mostraron ser más compactas y de fácil mantenimiento en comparación con el separador gravitacional, sin embargo, no existen en la literatura suficientes estudios experimentales/numéricos que involucren mezclas de gas natural o procesos a alta presión. Se encontró también que

la principal variable de diseño de los separadores gravitacionales es el parámetro de Souders-Brown, el cual, a pesar de ser empírico, si se realizan las correcciones y adecuaciones apropiadas es posible operar a alta presión sin sacrificar de manera considerable la eficiencia de separación. Debido que las mezclas de gas natural contienen una baja cantidad de líquido (menos del 4% vol), adquiere especial relevancia durante las simulaciones numéricas con CFD, el estudio de la fase discreta, es decir, la formación, distribución de tamaño, coalescencia y ruptura de las gotas presentes en la mezcla. Finalmente, la Dinámica de Fluidos Computacional se presenta como una alternativa para el análisis de procesos industriales, para los cuales la experimentación en campo puede ser costosa o riesgosa, como es el caso de sistemas submarinos o alta presión. ■■■

Agradecimientos

Agradecemos a COLCIENCIAS y al Capital Semilla para Investigación, Proyecto con código 2370 y semillero en nanotecnología, modelado y simulación numérica aplicada a la industria del petróleo, código 5482 de la Vicerrectoría de Investigación y Extensión de la Universidad Industrial de Santander.

Conflicto de intereses

Los autores declaran no tener ningún conflicto de intereses.

Referencias bibliográficas

- ABERNATHY, W. J. Chapter Gravity Settlers, Design. Unit Operation Handbook. 1993: Marcel Dekker .
- ARNOLD, Ken; STEWART, Maurice. Surface Production Operations-Design of Oil Handling Systems and Facilities, Volume 1: Gulf Professional Publishing, 2008.
- AUSTRHEIM, Trond; GJERTSEN, Lars H; HOFFMANN, Alex C. Experimental investigation of the performance of a large-scale scrubber operating at elevated pressure on live natural gas. In: Fuel. 2008. v. 87, n. 7, p. 1281–1288. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2007.07.022>
- BAHADORI, Alireza. Natural gas processing: technology and engineering design: Gulf Professional Publishing, 2014.
- BLEZARD, R. G. et al. chapter Production Engineering. Modern Petroleum Technology: Institution of Petroleum, John Wiley & Sons publisher, 2000..
- BOTHAMLEY, Mark. Gas/liquids separators-Quantifying separation performance-part 2. In: Oil and Gas Facilities. October, 2013. v. 2, n. 05, p. 35–47 <https://doi.org/10.2118/1013-0035-OGF>
- BRIGADEAU, Alexandre H. M. Modeling and Numerical Investigation of High Pressure Gas-Liquid Separation: Fakultet for ingeniørvitenskap og teknologi, 2007. Disponible em: <https://brage.bibsys.no/xmlui/handle/11250/233341>
- BURKHOLZ, Armin. Droplet Separation. Weinheim (Federal Republic of Germany): New York, NY (USA): Vch Pub, 1989.
- BYMASTER, Adam *et al.* High pressure gas-liquid separation: an experimental study on separator performance of natural gas streams at elevated pressures. In: Offshore Technology Conference, 2011. <https://doi.org/10.4043/21781-MS>
- CAO, Xuewen; BIAN, Jiang. Supersonic separation technology for natural gas processing: A review. Chemical Engineering and Processing-Process Intensification, 2019.
- CHEN, Bin *et al.* Simulating vapor-liquid nucleation of n-alkanes. In: The Journal of chemical physics. 2002. v. 116, n. 10, p. 4317–4329 <https://doi.org/10.1021/jp0463722>
- CHIN, R. W.; STANBRIDGE, D. I.; SCHOOK, R. Increasing separation capacity with new and proven technologies. 2002. <https://doi.org/10.2118/77495-MS>
- CHIN, RW; STANBRIDGE, DI; SCHOOK, R. Increasing separation capacity with new and proven technologies. In: SPE Annual Technical Conference And Exhibition, 2002. <https://doi.org/10.2118/77495-MS>.
- CRONQUIST, C. Evaluating and producing volatile oil-reservoirs. In: World Oil. 1979. v. 188, n. 5, p. 159
- ELSAYED, Khairy; LACOR, Chris. Modeling and Pareto optimization of gas cyclone separator performance using RBF type artificial neural networks and genetic algorithms. In: Powder Technology. 2012. v. 217, p. 84–99 <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2011.10.015>
- ERDAL, Ferhat M; SHIRAZI, Siamack A. Local velocity measurements and computational fluid dynamics (CFD) simulations of swirling flow in a cylindrical cyclone separator. Journal of energy resources technology. 2004. v. 126, n. 4, p. 326–333 <https://doi.org/10.1115/1.1805539>
- EXXONMOBIL. Chapter 5. Drums: Vapor-Liquid Separators. ExxonMobil Design Practices: ExxonMobil Research and Engineering Company, 1999.
- FEWEL JR, KJ; KEAN, James A. Computer modeling aids separator retrofit. In: Oil and Gas Journal. 1992. v. 90, n. 27.
- FORD, J; LAAKSONEN, A; KULMALA, M. Modification of the Dillmann-Meier theory of homogeneous nucleation. In: The Journal of chemical physics. 1993. v. 99, n. 1, p. 764–765 <https://doi.org/10.1063/1.465756>
- FRANKIEWICZ, Ted; BROWNE, Michael M; LEE, Chang-Ming. Reducing separation train sizes and increasing capacity by application of emerging technologies. In: Offshore Technology Conference, 2001. <https://doi.org/10.4043/13215-MS>
- FRANKIEWICZ, Ted; LEE, Chang-Ming. Using computational fluid dynamics (CFD) simulation to model fluid motion in process vessels on fixed and floating platforms. In: SPE Annual Technical Conference And Exhibition, 2002. <https://doi.org/10.2118/77494-MS>
- FRENKEL, Daan; SMIT, Berend. Understanding molecular simulation: From algorithms to applications. Computational sciences series, v. 1, p. 1–638, 2002.
- GHARIBSHAH, Reza; JAFARI, Arezou; AHMADI, Hamid. CFD investigation of enhanced extra-heavy oil recovery using metallic nanoparticles/steam injection in a micromodel with random pore distribution. Journal of Petroleum Science and Engineering, v. 174, p. 374–383, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2018.10.051>
- GIBBS, Josiah Willard. Elementary Principles in Statistical Mechanics, developed with special reference to the rational foundation of thermodynamics. New Haven, 1914.

25. GIRSHICK, Steven L; CHIU, Chia-Pin. Kinetic nucleation theory: A new expression for the rate of homogeneous nucleation from an ideal supersaturated vapor. *The journal of chemical physics*, v. 93, n. 2, p. 1273–1277, 1990. <https://doi.org/10.1063/1.459191>
26. GOMEZ, LE *et al.* Enhanced mechanistic model and field-application design of gas/liquid cylindrical cyclone separators. *Spe Journal*, v. 5, n. 02, p. 190–198, 2000. <https://doi.org/10.2118/62487-PA>
27. GONZÁLEZ-SILVA, G. *et al.* The importance of 3D mesh generation for large eddy simulation of gas–solid turbulent flows in a fluidized beds. *Int. J. Chem. Mol. Nucl. Mater. Metall. Eng.*, v. 6, n. 8, p. 770–777, 2012. ISNI:0000000091950263
28. GONZÁLEZ, Germán; JIMÉNEZ, Natalia Prieto; SALAZAR, Oscar Fabio. Fluid Dynamics of Gas-Solid Fluidized Beds. *Advanced Fluid Dynamics: InTech*, 2012. Disponible en: <https://www.intechopen.com/download/pdf/31571>
29. GONZALEZ, S.G. Modeling and simulation of cocurrent downflow reactor (Downer). 2008. 127 f. Master's thesis – State University of Campinas, Campinas, Brazil, 2008.
30. GPSA. GPSA Engineering Data Book. 11. ed: GPSA publisher, v. 1.
31. CREG. Sector Gas Natural en Colombia - Transporte de Gas. 2016, Cartagena. Anais... Cartagena: [s.n.], 2016. p. 41.
32. GRØDAL, Evert O; REALFF, Matthew J. Optimal design of two- and three-phase separators: A mathematical programming formulation. In: SPE ANNUAL TECHNICAL CONFERENCE AND EXHIBITION, 1999. <https://doi.org/10.2118/56645-MS>
33. GUO, Boyan; GHALAMBOR, Ali. *Natural gas engineering handbook*: Elsevier, 2014.
34. GYARMATHY, George. The spherical droplet in gaseous carrier streams: review and synthesis. *Multiphase science and technology*, v. 1, n. 1–4, 1982. <https://doi.org/10.1615/MultScienTechn.v1.i1-4.20>
35. HALLANGER, A; SOENSTABOE, F; KNUTSEN, T. A simulation model for three-phase gravity separators. In: SPE Annual Technical Conference And Exhibition, 1996. <https://doi.org/10.2118/36644-MS>
36. HAN, Qing *et al.* The effect of geometry and operation conditions on the performance of a gas-liquid cylindrical cyclone separator with new structure. In: AIP Conference Proceedings, 2013. <https://doi.org/10.1063/1.4816885>
37. HANSEN, Ernst WM. Phenomenological Modelling and Simulation of Fluid Flow and Separation Behavior in Offshore Gravity Separators. *ASME-PUBLICATIONS-PVP*, v. 431, p. 23–30, 2001.
38. HANSEN, Ernst WM; CELIUS, Harald K; HAFSKJOLD, Bjørn. Fluid flow and separation mechanisms in offshore separation equipment. In: International Symposium On Two-Phase Flow Modelling And Experimentation, 1995. p. 16.
39. HANSEN, Ernst WM; RORTVEIT, GJ. Numerical simulation of fluid mechanisms and separation behavior in offshore gravity separators. *Surfactant science series*, v. 132, p. 593, 2006.
40. HANSEN, EWM *et al.* Fluid flow modelling of gravity separators. In: *PROC*, 1991. p. 364–380.
41. HANSEN, EWM *et al.* Numerical Simulation of Fluid Flow Behavior Inside, and Redesign of a Field Separator. In: *PROC*, 1993, 6th International Conference on Multiphase Production, Cannes, Francia, 19–21 Junio, p. 117–129.
42. HOFFMANN, Alex C.; STEIN, Louis E. *Gas Cyclones and Swirl Tubes: Principles, Design, and Operation*. 2. ed. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2008. Disponible en: <https://www.springer.com/gp/book/9783540746942>
43. HREIZ, Rainier *et al.* Hydrodynamics and velocity measurements in gas–liquid swirling flows in cylindrical cyclones. *Chemical engineering research and design*, v. 92, n. 11, p. 2231–2246, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.cherd.2014.02.029>
44. HREIZ, Rainier; GENTRIC, Caroline; MIDOUX, Noël. Numerical investigation of swirling flow in cylindrical cyclones. *Chemical engineering research and design*, v. 89, n. 12, p. 2521–2539, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.cherd.2011.05.001>
45. JEONG, Woowon; SEONG, Jaehoon. Comparison of effects on technical variances of computational fluid dynamics (CFD) software based on finite element and finite volume methods. *International Journal of Mechanical Sciences*, v. 78, p. 19–26, 1 jan. 2014. <https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2013.10.017>
46. KALIKMANOV, VI; WÖLK, J; KRASKA, T. Argon nucleation: Bringing together theory, simulations, and experiment. *The Journal of chemical physics*, v. 128, n. 12, p. 124506, 2008. <https://doi.org/10.1063/1.2888995>
47. KALIKMANOV, Vitaly *et al.* New developments in nucleation theory and their impact on natural gas separation. In: SPE Annual Technical Conference And Exhibition, 2007. <https://doi.org/10.2118/110736-MS>
48. KALIKMANOV, Vitaly I. *Classical nucleation theory*. Nucleation theory: Springer, 2013. p. 17–41.
49. KATZ, Joseph L; WIEDERSICH, H. Nucleation theory without Maxwell demons. *Journal of colloid and interface science*, v. 61, n. 2, p. 351–355, 1977. [https://doi.org/10.1016/0021-9797\(77\)90397-6](https://doi.org/10.1016/0021-9797(77)90397-6)
50. KHAROUA, N.; KHEZZAR, L.; SAADAWI, H. CFD Modelling of a Horizontal Three-Phase Separator: A Population Balance Approach. *American Journal of Fluid Dynamics*, v. 3, n. 4, p. 101–118, 2013. <https://doi.org/10.5923/j.ajfd.20130304.03>
51. LALEH, Ali Pourahmadi; SVRCEK, William Y.; MONNERAY, Wayne D. Design and CFD studies of multiphase separators—a review. *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, v. 90, n. 6, p. 1547–1561, Diciembre 2012. <https://doi.org/10.1002/cjce.20665>
52. LEBON, Georgy; JOU, David; CASAS-VÁZQUEZ, José. *Understanding non-equilibrium thermodynamics*: Springer, 2008. v. 295.
53. LEE, Chang-Ming *et al.* Field confirmation of CFD design for FP-SO-mounted separator. In: *Offshore Technology Conference*, 2004. <https://doi.org/10.4043/16137-MS>
54. LEE, Joseph M; KHAN, Rafiqul I; PHELPS, Daniel W. Debottlenecking and Computational-Fluid-Dynamics Studies of High-and Low-Pressure Production Separators. *SPE Projects, Facilities & Construction*, v. 4, n. 04, p. 124–131, 2009. <https://doi.org/10.2118/115735-MS>
55. LU, Yaojun *et al.* Effect of Internal Baffles on Volumetric Utilization of an FWKO—A CFD Evaluation. In: SPE Annual Technical Conference And Exhibition, 2007. <https://doi.org/10.2118/109944-MS>
56. LUIJTEN, Carlo Cornelis Maria. Nucleation and droplet growth at high pressure: Eindhoven University of Technology, The Netherlands, 1998.
57. MACKENZIE, Alasdair *et al.* A comparison of CFD software packages' ability to model a submerged jet. The 11th International Conference on CFD in the Minerals and Process Industries. Dickson, Australia: Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation (CSIRO), 2015. p. 1–4. Disponible en: http://www.cfd.com.au/cfd_conf15/PDFs/152MAC.pdf
58. MALISKA, Clovis Raimundo. *Transferência de calor e mecânica dos fluidos computacional*: Grupo Gen-LTC, 2017.
59. MERIKANTO, Joonas. Monte Carlo simulations of molecular clusters in nucleation. [S.l.]: Finnish Assosiation for Aerosol Research, 2007b. Disponible en: <https://helda.helsinki.fi/handle/10138/229476>

60. MERIKANTO, Joonas. Monte Carlo simulations of molecular clusters in nucleation. University of Helsinki, Department of Physics 2007. Disponible en: <https://helda.helsinki.fi/handle/10138/229476>
61. MOKHATAB, Saeid; POE, William A.; MAK, John Y. Chapter 3 - Basic Concepts of Natural Gas Processing. Handbook of Natural Gas Transmission and Processing (Third Edition). Boston: Gulf Professional Publishing, 2015. p. 123–135. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780128014998000031>
62. MONNERY, WD; SVRCEK, WY. Analytical study of liquid/vapor separation efficiency. study developed for Petroleum Technology Alliance Canada, 2000.
63. MORROW, T. B. EW. M Hansen, H. Heitmann, B. Laksa, AEllingsen, Fluid Flow Modelling of Gravity Separators. Proceedings of the 5th International Conference on MultiPhase Production. Cannes, France, 1991; pp 364–380.
64. MOVAFAGHIAN, S et al. The effects of geometry, fluid properties and pressure on the hydrodynamics of gas–liquid cylindrical cyclone separators. International Journal of Multiphase Flow, v. 26, n. 6, p. 999–1018, 2000. [https://doi.org/10.1016/S0301-9322\(99\)00076-2](https://doi.org/10.1016/S0301-9322(99)00076-2)
65. NAPARI, Ismo. Density functional theory of nucleation and phase behavior in binary fluid systems. Dissertation, September 2000, University of Helsinki, Department of Physics, Theoretical Physics Division, Faculty of Science
66. NEWTON, Timothy; CONNOLLY, David; MOKHATAB, Saeid. Tools to model multiphase separation. Chemical engineering progress, v. 103, n. 6, p. 26–31, 2007.
67. NIEUWSTADT, Frans T. M.; DIRKZWAGER, Maarten. A Fluid Mechanics Model for an Axial Cyclone Separator. Industrial & Engineering Chemistry Research, v. 34, n. 10, p. 3399–3404, 1 out. 1995. <https://doi.org/10.1021/ie00037a027>
68. OXTOBY, David W; KASHCHIEV, Dimo. A general relation between the nucleation work and the size of the nucleus in multicomponent nucleation. The Journal of chemical physics, v. 100, n. 10, p. 7665–7671, 1994. <https://doi.org/10.1063/1.466859>
69. PATHAK, Harshad Narayan. Nucleation and Droplet Growth During Co-condensation of Nonane and D 2 O in a Supersonic Nozzle: Tesis de Doctorado The Ohio State University, 2013.
70. PINILLA, Laura Isabel Díaz; MENESES-PRADO, Leidy Paola; GONZÁLEZ-SILVA, Germán. Dinámica de fluidos computacional en el análisis de intercambiadores de calor de coraza y tubos. Revista UIS Ingenierías, v. 18, n. 2, p. 237–244, 8 mar. 2019. <https://doi.org/10.18273/revuin.v18n2-2019022>
71. POURAHMADI LALEH, Ali; SVRCEK, William Y.; MONNERY, Wayne. Computational Fluid Dynamics-Based Study of an Oilfield Separator—Part I: A Realistic Simulation. Oil and Gas Facilities, v. 1, n. 06, p. 57–68, 2012. <https://doi.org/10.2118/161212-PA>
72. CHAVES GUERRERO, Arlex; PRIETO JIMÉNEZ, Natalia y GONZÁLEZ SILVA, Germán. Comparative Study of Equations of State for the Dew Curves Calculation in High Pressure Natural Gas Mixtures. Revista Logos Ciencia & Tecnología, v. 11, n. 1, p. 13, 2018. <https://doi.org/10.1021/ie0110282>.
73. REZENDE, Ricardo Vicente de Paula. Modelagem matemática e desenvolvimento de metodologia computacional para a simulação numérica do escoamento bifásico de ar e ferro-gusa em canal de corrida de alto-forno. Tesis de maestría Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico, Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica. Florianópolis, 2013. <https://repositorio.ufsc.br/handle/123456789/106615>
74. ROSIN, PAUL. The laws governing the fineness of powdered coal. J. Inst. Fuel., v. 7, p. 29–36, 1933.
75. SETEKLEIV, Eddie. Experimental characterization of scrubber internals at low and elevated pressures. Ph. D. thesis. Trondheim, Norway: Norwegian University of Science and Technology (NTNU). 2012
76. SILVA, Germán González; PRIETO, Natalia; MERCADO, Iván. Large Eddy Simulation (LES) Aplicado a un lecho fluidizado gas–sólido. Parte I: Reactor a escala de laboratorio. Revista UIS Ingenierías, v. 17, n. 1, p. 93–104, 2018. <https://doi.org/10.18273/revuin.v17n1-2018009>
77. SOUDERS, Mott; BROWN, George Granger. Design of fractionating columns I. Entrainment and capacity. Industrial & Engineering Chemistry, v. 26, n. 1, p. 98–103, 1934. <https://doi.org/10.1021/ie50289a025>
78. STANLEY, WALAS; WALAS, Ed. Chemical process equipment-selection and design. Butterman-Heinemam Series, 1990.
79. SULZER. Brochure Gas/Liquid Separation Technology. Available in www.sulzer.com/-/media/files/products/separation-technology/feed-inlet-devices/gas_liquid_separation_technology.aspx
80. SVRCEK, WY; MONNERY, WD. Design two-phase separators within the right limits. Chemical engineering progress, v. 89, n. 10, p. 53–60, 1993.
81. SWANBORN, R. A. A new approach to the design of gas-liquid separators for the oil industry. 1988. Tesis de Doctorado – Delft University of Technology. Disponible en: <http://resolver.tudelft.nl/uuid:aa5fc516-6b58-4900-90d8-e15a6f332c84>
82. SWARTZENDRUBER, Jason; FADDA, Dani; TAYLOR, David. Accommodating Last Minute Changes: Two Phase Separation Performance Validated by CFD. In: ASME 2005 Fluids Engineering Division Summer Meeting, 2005. American Society of Mechanical Engineers, 2005. p. 713–715. <https://doi.org/10.1115/FEDSM2005-77439>
83. VERLAAN, C. C. J. Performance of novel mist eliminators. Tesis de Doctorado – Delft University of Technology, 1991. Disponible en: <http://resolver.tudelft.nl/uuid:9e964cdf-4bcb-41c6-84ed-c6cf11e684aa>
84. WALLIS, Graham B. One-dimensional two-phase flow. New York: McGraw Hill Higher Education, 1969.
85. WANG, Shoubo *et al.* Gas-Liquid Cylindrical Cyclone (GLCC©) Compact Separators For Wet Gas Applications. Journal of energy resources technology, v. 125, n. 1, p. 43–50, 2003. <https://doi.org/10.1115/1.1513180>
86. WANG, Shuyan *et al.* Effect of the inlet angle on the performance of a cyclone separator using CFD-DEM. Advanced Powder Technology, v. 30, n. 2, p. 227–239, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.apt.2018.10.027>
87. WASILEWSKI, Marek; BRAR, Lakhbir Singh. Effect of the inlet duct angle on the performance of cyclone separators. Separation and Purification Technology, v. 213, p. 19–33, 2019.
88. WILEMSKI, Gerald. The Kelvin equation and self-consistent nucleation theory. The Journal of chemical physics, v. 103, n. 3, p. 1119–1126, 1995.
89. WILKINSON, D; WALDIE, B. CFD and experimental studies of fluid and particle flow in horizontal primary separators. Chemical engineering research & design, v. 72, n. 2, p. 189–196, 1994. <https://doi.org/10.1063/1.469822>
90. WILKINSON, Derek *et al.* Baffle plate configurations to enhance separation in horizontal primary separators. Chemical Engineering Journal, v. 77, n. 3, p. 221–226, 2000.
91. XU, Weiwei *et al.* Performance evaluation of a new cyclone separator—Part II simulation results. Separation and Purification Technology, v. 160, p. 112–116, 2016.
92. YOUNG, JB. The condensation and evaporation of liquid droplets in a pure vapour at arbitrary Knudsen number. International journal

of heat and mass transfer, v. 34, n. 7, p. 1649–1661, 1991. [https://doi.org/10.1016/0017-9310\(91\)90143-3](https://doi.org/10.1016/0017-9310(91)90143-3)

93. YU, J. *et al.* Oil, water and gas three-phase cyclone separator. Patente China: CN203694675U, 2013
94. ZHANG, X. D. *et al.* Embedded-type inverted double-cone oil-gas-water triphase cyclone separator. Patente China: CNI03551262B, 2014.