

MODELAMIENTO DE LA SEPARACIÓN DE DOS FASES LÍQUIDAS INMISCIBLES POR GRAVEDAD EN UN TANQUE DE PROCESO *GUNBARREL*

MODELING SEPARATION OF TWO LIQUID PHASES IMMISCIBLES BY GRAVITY IN A GUNBARREL PROCESS TANK

Autores:

Castañeda Sabogal Jossie Alexander¹, Castiblanco Zamudio Brandon Estiven².

^{1,2}Estudiante ingeniería Química. Facultad de Ciencias Naturales e Ingeniería, Departamento de Ingeniería Química, Universidad Jorge Tadeo Lozano de Bogotá.

jossiea.castanedas@utadeo.edu.co¹, brandone.castiblancoz@utadeo.edu.co²

Directores

Conde Rivera Laura Rosa, Restrepo Monguí Gustavo Alonso

Nomenclatura

°API - American Petroleum Institute gravity, medida de densidad relativa al agua.

BS&W - Basic Sediments and Water, sedimentos básicos y agua, es la fracción volumétrica de agua y sedimentos en el crudo, %V.

U_s - Velocidad de sedimentación, mm/s, m/s, in/s.

C_o - Constante ecuación Arnold para diseño de gun barrel.

ρ_p - Densidad de la partícula o fase dispersa, kg/m³, lb/ft³.

ρ_f - Densidad de la fase continua, kg/m³, lb/ft³.

μ_f - Viscosidad de la emulsión, cP.

μ_o - Viscosidad del crudo, cP.

d_p - Diámetro de partícula, μm .

d_T - Diámetro del tanque, m, mm, ft, in.

ϕ - Facción volumétrica de agua.

k - Constante empírica de coalescencia.

v_e - Flujo emulsión, BFPD, m³/h.

v_o - Flujo de crudo, BOPD, m³/h.

ΔSG - Diferencia entre la densidad de la partícula y el medio, kg/m³, lb/ft³.

F- Factor de corto circuito.

SEM - Sin emulsión.

CEM - Con emulsión.

Resumen

En el presente estudio, se realiza el análisis y modelamiento diferencial de un tanque de deshidratación industrial, gunbarrel. Este tipo de equipos son muy usados para la remoción de agua en crudos pesados y extrapesados. En Colombia estos crudos representan más del 40% de la producción nacional. Teniendo en cuenta su importancia en este sector, se optó por realizar un modelo que tuviera como base matemática los fenómenos que permiten la separación tales como coalescencia, velocidad de sedimentación y balance de masa estacionario, de tal forma que ofrezca una idea más clara de cómo funciona este equipo, mostrando perfiles de separación y comportamiento del tamaño de gota, que pueda servir como guía para mejorar los métodos de diseño actuales, los cuales son limitados al contemplar únicamente el fenómeno de sedimentación, establecido por la ley de Stokes, y que no permiten predecir el tiempo de residencia necesario para la separación, sino que acuden a datos obtenidos mediante pruebas de botella, que si bien dan una idea de la facilidad de separación de una emulsión, son sistemas discontinuos, que difieren del sistema de flujo correspondiente al gunbarrel.

Usando datos de entrada y salida de equipos reales, se realizó la validación del modelo diferencial y se obtuvieron resultados bastante cercanos en cuanto a la remoción de agua, además de un perfil correspondiente que muestra cómo se da la separación en el colchón de crudo y cómo podría ser la distribución de partícula a través de éste, cuyos

comportamientos son similares a lo que se esperaría en un proceso de deshidratación por gravedad. Adicionalmente, se desarrolló un modelo alternativo y se generó un perfil de separación, que tiene en cuenta la viscosidad de la emulsión crudo-agua para analizar su efecto en la separación.

Palabras clave: gunbarrel, tanque de lavado, BS&W, diámetro de partícula, emulsión.

Abstract

In the present study, the analysis and differential modeling of an industrial washtank, gunbarrel, is carried out. This type of equipment is widely used for the removal of water in heavy and extra-heavy crudes, in Colombia these crude oils represent about 40% of the national production. Taking into account its importance in this sector, a model based on the phenomena that allow the separation such as coalescence, sedimentation velocity and stationary mass balance, is proposed, in such a way that it offers a clearer idea of how this equipment works, showing separation profiles and drop size behaviour, which can serve as a guide to improve current design methods, which have as limitations that only takes account the sedimentation phenomenon, established by the Stokes law, and that they don't allow to predict the residence time needed for the separation, requiring data from bottle tests that if may give an idea of the ease of separation, are batch systems that differ from the continuous regime of the gunbarrel.

Using data from the input and output of real equipment, validation of the differential model was performed and close water removal results were obtained, in addition to a corresponding profile that shows how separation occurs in the crude mattress and how could be the particle distribution through this, these behaviors are similar to what would be expected in a process like this. In addition, an alternative model was proposed and a separation profile was generated, which took into account the viscosity of a crude-water emulsion to analyse its effect on separation.

Keywords: gunbarrel, wash tank, BS&W, drop size, emulsion.

Introducción

En Colombia, según datos de la agencia nacional de hidrocarburos (2018), aproximadamente el 40% de la producción nacional de crudo corresponde a crudos pesados y extrapesados ($^{\circ}\text{API} < 20$), provenientes de campos como Castilla, Chichimene, Akacias, Quifa, Rubiales y Nare. Para la remoción de sedimentos básicos y agua, BS&W, de este tipo de crudos uno de los equipos de mayor uso son los gunbarrel, que son de los equipos más antiguos usados en la deshidratación de crudos pesados (Arnold & Stewart, 2008). Sin embargo, a pesar de su amplio uso, es común encontrar problemas operativos y de dimensionamiento, que implican sobrecostos en el diseño y/o en operación. Las ecuaciones normalmente usadas para dimensionar o evaluar tanques gunbarrel, son útiles para calcular el diámetro del equipo, pero no predicen un perfil de BS&W en función del nivel de líquido ni permiten estimar el tiempo de residencia requerido.

Los fenómenos físicos que permiten que estos equipos disminuyan la concentración de agua emulsionada son: la coalescencia, fenómeno en el cual una gota se adhiere a otra formando una partícula o gota más grande y estable; así como la sedimentación de las gotas por efecto de la gravedad. Dado que la concentración del agua y sedimentos es baja, su sedimentación puede ser interpretada a través de la ley de Stokes que permite establecer la velocidad de sedimentación de las gotas, considerando para ello un coeficiente de arrastre que cuantifica el efecto de la resistencia que se opone a la sedimentación de las gotas (Cheremisinoff, 2002). Adicionalmente estos fenómenos son dependientes de variables de proceso como la temperatura, la cual disminuye la viscosidad de la emulsión, favoreciendo la sedimentación, y el flujo de la emulsión, que afecta la formación de la interfase.

El funcionamiento de un gunbarrel se muestra en la Figura 1, el flujo es enviado hacia el distribuidor que se encarga de alimentar el tanque de manera que se aproveche en su totalidad el área trasversal del separador, minimizando de esta manera cortos circuitos y zonas muertas (Arnold & Stewart, 2008). Al interior del tanque tiene lugar la separación de las fases, las cuales son: la fase ligera o de crudo, la fase pesada o de agua y finalmente la interfase. Normalmente el distribuidor está ubicado por debajo de la interfase en el “colchón” de agua, lo que favorece la separación o “lavado” del agua libre, la cual se separa

instantáneamente, y de las gotas de agua más grandes contenidas en la fase. Por esta razón los *gunbarrel* son también conocidos como “tanques de lavado”. El crudo con agua emulsionada asciende en hilos de flujo hacia la fase o “colchón” de crudo, como se muestra en la Figura 2, en donde se da el proceso de sedimentación y coalescencia.

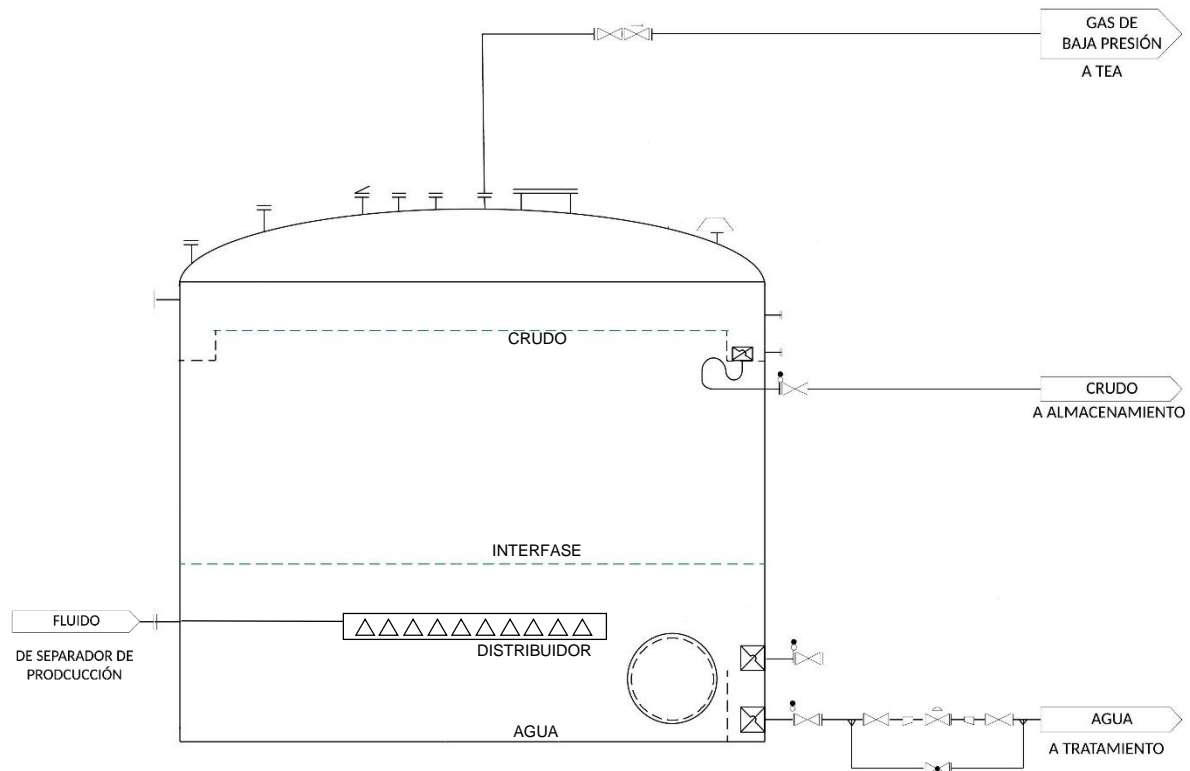


Figura 1 Equipo gunbarrel.

La coalescencia consiste en la fusión de agua, formando gotas de mayor tamaño, que a su vez sedimentan con mayor velocidad. Para lograr la separación esperada del agua emulsionada, normalmente hasta un BS&W de 0.5% que es la condición requerida para transporte de crudo, se requieren tiempos de residencia entre 4 y 24 horas (Arnold & Stewart, 2008). Finalmente, luego de este tiempo de residencia en tránsito a través del colchón de crudo el fluido rebosa por la parte superior del tanque y sale normalmente hacia los tanques de almacenamiento, mientras que el agua acumulada en la correspondiente fase es dirigida a tratamiento. El nivel de la interfase es mantenido manipulando el flujo de salida de agua por medio de un control automático. Adicional a esto, se puede añadir que

estos equipos en algunos casos, cuando hay gas disuelto en el fluido alimentado al tanque, cuentan con una bota de gas interna o externa para la separación de los vapores generados por calentamiento o por despresurización, dado que, por lo general, los gunbarrel son tanques atmosféricos diseñados bajo la norma API-650.

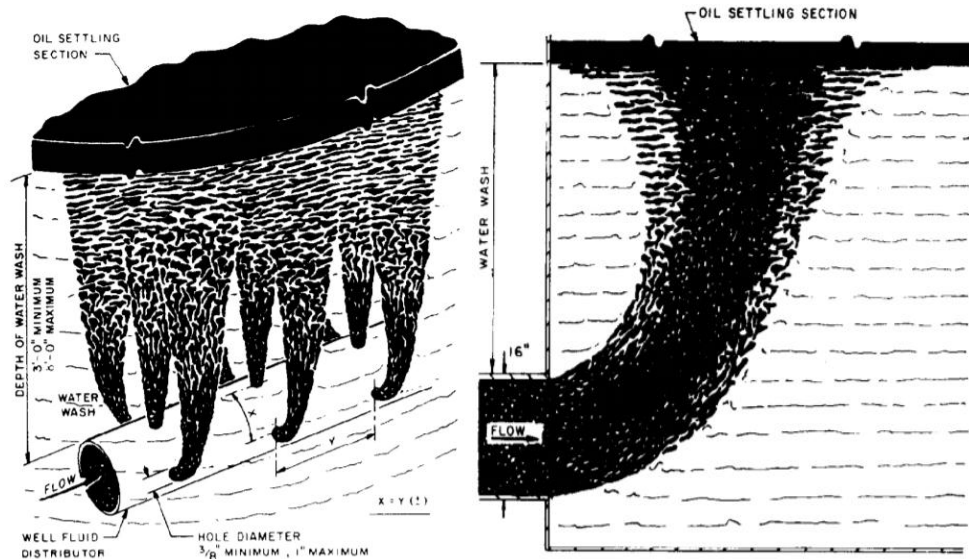


Figura 2 Distribuidor típico de un gunbarrel, tomado Bradley et al, 1992

Si se desea hacer un dimensionamiento que tenga en cuenta las condiciones del fluido tanto fase dispersa como fase continua, se tiene la ecuación 1, con la cual se puede encontrar un diámetro del separador de manera directa (Arnold & Stewart, 2008).

$$dT = Co1 \left[\frac{F Q_o \mu_o}{\Delta SG d_m^2} \right]^{\frac{1}{2}} \quad [1]$$

Esta ecuación, aunque tiene en cuenta varios parámetros de los fluidos que se quiere separar y el fenómeno de velocidad de sedimentación, no considera el efecto que presenta un gradiente de concentración del agua en la zona de coalescencia, que depende en gran medida de la distribución de tamaño de las partículas de agua. Además, no incluye efecto de los gradientes de tamaño de gota en la velocidad de sedimentación de las partículas. Por otra parte, normalmente se requiere la inyección de desmulsificantes para favorecer la separación de la emulsión, fenómeno que no es cuantificado por el modelo tradicional ni el modelo propuesto. Por último, en la etapa de diseño de un gunbarrel se requiere de la

realización de pruebas de botella, que consisten en medir el tiempo de separación de la emulsión en un recipiente de laboratorio conocido como “zanahoria”, por su forma cónica en el fondo donde hay una indicación del volumen de agua separada. Sin embargo, la naturaleza dinámica del sistema requiere pruebas en campo tales como medición en línea de gota, aunque asumiendo en este caso costos elevados.

Por lo anterior, se plantea el desarrollo de un modelo matemático para el dimensionamiento y/o evaluación de tanques separadores *gunbarrel* que tenga en cuenta, además de la sedimentación, la coalescencia y el cambio de la distribución del tamaño de partículas en la medida en que el crudo asciende a través del equipo.

Metodología.

- **Planteamiento del modelo matemático**

El modelo matemático se desarrolló para que produjera los siguientes resultados.

- Predicción de un perfil de BS&W a partir de la inclusión del fenómeno de coalescencia y de balances de materia diferenciales.
- Predicción del tiempo de coalescencia requerido.
- Predicción de un tamaño de partícula a través del tanque de separación.

El planteamiento de la ecuación diferencial empezó teniendo en cuenta el eje axial del tanque, considerando el perfil de concentraciones a través del mismo, teniendo en cuenta elementos diferenciales de sección transversal del tanque, Figura 3, cuyo número depende de las dimensiones del tanque, en los cuales ocurre coalescencia; luego, se relacionó el balance de masa con el cambio en la velocidad de sedimentación a medida que las partículas cambian de tamaño como lo muestra de forma general en la ecuación 2 (Lake, 2007).

$$U_s = \frac{g(\rho_p - \rho_f)d_p^2}{18 \mu_f} \quad [2]$$

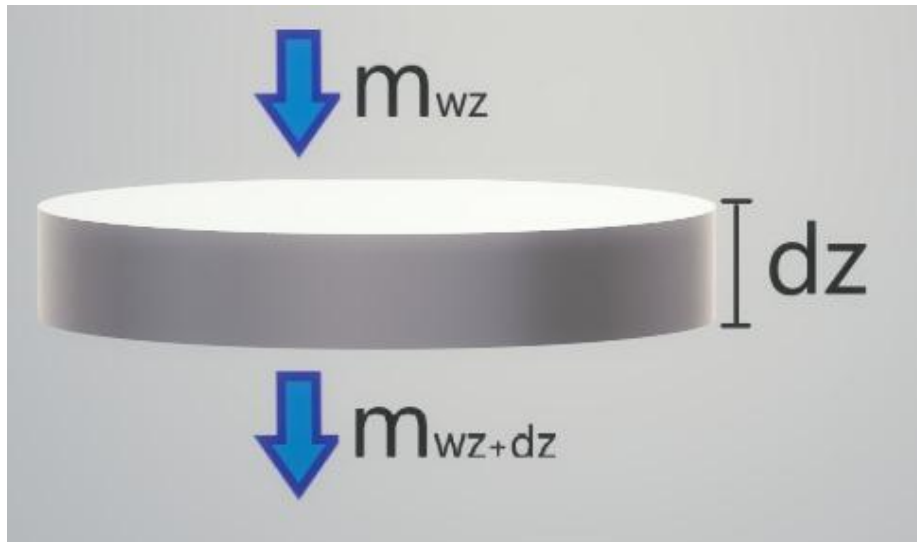


Figura 3 Volumen diferencial trabajado

Para el desarrollo del modelo, se realizó un balance de materia dependiente de la sedimentación del agua. Con el fin de simplificar los análisis se tuvieron en cuenta las siguientes premisas y suposiciones:

- La sedimentación ocurre en una sola dirección.
- Las gotas tienen geometría perfectamente esférica y su diámetro es uniforme en un determinado elemento finito.
- En cada elemento finito la velocidad de la gota corresponde a su velocidad terminal de sedimentación.
- Se cumple la condición de mezcla perfecta en cada uno de los elementos finitos.
- La temperatura a lo largo del gunbarrel es constante.
- El modelo sólo cubre la sedimentación de las gotas de agua en la fase crudo
- No se incluye el efecto de desemulsificantes en el fenómeno de separación de la emulsión.
- El tiempo de coalescencia es constante.

Para realizar la solución de estos fenómenos diferenciales se hizo uso del software *Wolfram Mathematica*, para el desarrollo del modelo diferencial, donde primero se ingresaron los valores constantes de procesos, como temperatura, diámetro del tanque, nivel del líquido en el tanque, diámetro de partícula inicial y BS&W inicial. Ya habiendo ingresado los

parámetros estables y manipulables del proceso se usó el comando NDSolve en *Wolfram Mathematica*, el cual a partir del método LSODA (L. R. Petzold, A.C Hindmarsh) selecciona automáticamente entre los métodos no rígido (Adams) y rígido (BDF), utilizando el método no rígido inicialmente, y monitorea dinámicamente los datos para decidir qué método usar (NEA, 2005), para realizar la solución numérica-diferencial del modelo, logrando así obtener resultados de perfiles de concentración bajo los parámetros y condiciones establecidos con anterioridad.

Inicialmente, como se mencionó anteriormente, se realizó un balance de masa como se muestra en la ecuación 3, con el fin de obtener la ecuación 4 que permite encontrar la predicción deseada del BS&W en función de la altura del colchón de crudo.

$$m_o = m_i - \frac{dm}{dz} dz = m_i - \left(\frac{dm}{dt}\right) \left(\frac{dt}{dz}\right) dz \quad [3]$$

$$\left(\frac{dm}{dz}\right) = \left(\frac{dm}{dt}\right) \left(\frac{dt}{dz}\right)$$

$$\left(\frac{dBSW}{dz}\right) = \frac{\left(\frac{dm}{dt}\right) \left(\frac{dt}{dz}\right)}{VT * \rho p} \quad [4]$$

Posteriormente se usó la ecuación de Stokes mostrada en Arnold (2008), como ecuación auxiliar de la forma que se muestra en la ecuación 5.

$$\left(\frac{dz}{dt}\right) = \frac{Co(\rho p - \rho f) d p^2}{\mu f}$$

$$\left(\frac{dt}{dz}\right) = \frac{\mu f}{Co(\rho p - \rho f) d p^2} \quad [5]$$

Luego haciendo uso de las propiedades de las derivadas se obtuvo la ecuación 6, con el fin de tener derivadas que puedan ser obtenidas a partir de ecuaciones de los fluidos conocidas como Stokes y coalescencia.

$$\left(\frac{dm}{dt}\right) = \left(\frac{dm}{dp}\right) \left(\frac{dp}{dt}\right) \quad [6]$$

Usando la ecuación de coalescencia mostrada en Arnold (2008), ecuación 7, despejando el diámetro final de partícula y derivando con respecto al tiempo, se obtuvo la ecuación 8.

$$t = \frac{\pi}{6} \left(\frac{d^4 - (d_0)^4}{\phi k} \right) \quad [7]$$

$$\left(\frac{dp}{dt} \right) = \frac{1}{4} \left(\frac{6}{\pi} tk\phi + dp^4 \right)^{\frac{-3}{4}} \left(\frac{6}{\pi} k\phi \right) \quad [8]$$

A continuación, teniendo en cuenta la definición de BS&W, ecuación 9, donde V es el volumen de agua y VT es el volumen total o mezcla crudo-agua, se consiguió la ecuación 10.

$$BS\&W = \frac{V}{V_T} \quad [9]$$

$$\left(\frac{dm}{dp} \right) = \left(\frac{dBSW}{dp} \right) V_T \rho_p \quad [10]$$

Posteriormente, para obtener la ecuación 12, se despejó y derivó la ecuación 1, teniendo en cuenta la equivalencia presentada en la ecuación 11 donde v_o es caudal de crudo y v_e es caudal de emulsión, esto con el fin de tener una dependencia directa entre el cambio de BS&W y el diámetro del tanque.

$$v_o = v_e(1 - \phi) \quad [11]$$

$$\left(\frac{dBSW}{dp} \right) = - \frac{2 dT^2 (\rho_p - \rho_f) \left(\frac{(1 - \phi) Co_1 F v_e \mu f}{dT^2 (\rho_p - \rho_f)} \right)^{\frac{-3}{4}}}{Co_1 F v_e \mu f} \quad [12]$$

Luego de tener las ecuaciones necesarias para solucionar el balance de masa, se continuó con la definición del comportamiento de la partícula durante la separación y cuya solución permite la obtención del perfil de tamaño de gota en función de la altura del colchón de crudo, como se muestra en la ecuación 13.

$$\left(\frac{dp}{dz} \right) = \left(\frac{dp}{dBSW} \right) \left(\frac{dBSW}{dt} \right) \left(\frac{dt}{dz} \right) \quad [13]$$

Para conseguir la ecuación 15, necesaria en la solución del perfil de tamaño de partícula, se hizo uso de la ecuación 14, presente en Arnold (2008), la cual se derivó con respecto a BS&W, esta vez para especificar el comportamiento de una sólo partícula y no considerar el diseño del tanque.

$$dp = 200 \mu f^{\frac{1}{4}} BS\&W^{\frac{1}{3}} \quad [14]$$

$$\left(\frac{dp}{dBSW}\right) = \frac{200 \mu_f^{\frac{1}{4}}}{3 BSW^{\frac{2}{3}}} \quad [15]$$

En seguida para terminar de definir la ecuación 13, se derivó la ecuación de coalescencia con respecto al BS&W, ecuación 7, usando la ecuación 14 como auxiliar y remplazándola en el diámetro inicial, obteniendo así la ecuación 16.

$$\left(\frac{dBSW}{dt}\right) = -\frac{\phi^2 k}{\left(\left(200 \mu_f^{\frac{1}{4}} BSW^{\frac{1}{3}}\right)^4 - dp^4\right) \frac{\pi}{6}} \quad [16]$$

Para finalizar, se hizo un modelo alterno el cual en lugar de usar μ_f como sugiere Arnold, viscosidad del crudo, se optó por usar la correlación de Guth & Simha (Arnold, 2008) para el cálculo de la viscosidad de emulsión, ecuación 17, teniendo en cuenta que la gota se desplaza en una emulsión cuyas propiedades cambian a medida que la separación se realiza.

$$\mu_f = \mu_o(1 + 2.5 (\phi) + 10 (\phi)^2) \quad [17]$$

Los datos que se muestran en la Tabla 1, fueron los usados para realizar la comprobación del modelo y corresponden a tanques reales que se encuentran en operación, esto fueron proporcionados por el codirector. Para realizar los cálculos de densidad y viscosidad necesarios en la elaborar la Tabla 2, se usaron correlaciones proporcionadas por el codirector que son de carácter confidencial.

Tabla 1 Tabla equipos analizados

Gunbarrel	Diámetro (ft)	Nivel operativo (ft)	Densidad media del crudo (lb/ft³)	Densidad media del agua (lb/ft³)	Viscosidad media del crudo (cP)
GB-JxxC	30	25	55.25	60.80	12.96
GB-CxxA	30	25	55.04	60.59	11.21
GB-CxxB	35	28	55.76	60.76	12.58
GB-JxxB	35	28	55.25	60.80	12.96

Resultados

De acuerdo con las simulaciones realizadas, los perfiles de BS&W y diámetro de partícula en función de la altura del líquido en el tanque, se presentan en las Figuras 4a y 4b. Los valores extremos de contenido de BS&W que aparecen en la Figura 4a, corresponden a los valores conocidos de las corrientes de entrada y salida del GB-CxxB, respectivamente, en el día de operación 29 indicado en la Tabla 2.

La separación ocurre de forma que la concentración de agua decrece a medida que atraviesa el colchón de crudo (Figura 4b) y, como se esperaba, a medida que el BS&W disminuye la separación se vuelve más difícil, requiriendo cerca de un tercio de la longitud total del colchón de crudo para remover el último 10%. Esto puede estar asociado con el comportamiento del diámetro de partícula, que es mayor en la parte inferior del colchón de crudo y disminuye al incrementar la altura dentro de éste, como se observa en la Figura 4b, lo que causa, como se mencionó anteriormente, que las velocidades de sedimentación disminuyan.

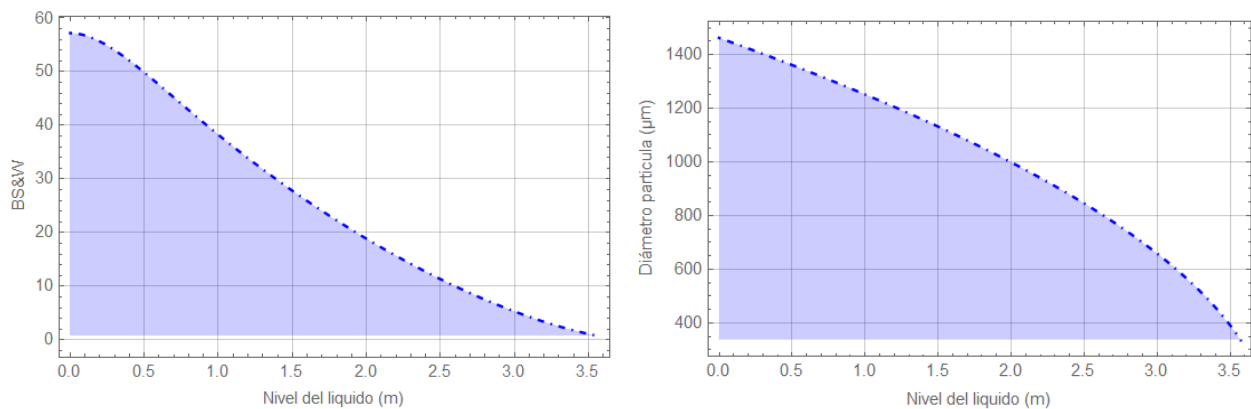


Figura 4. Perfiles de BS&W y diámetro de partícula en función de la altura del líquido en el colchón de crudo – GB-CxxB – día de operación 29 – Modelo Viscosidad de crudo constante. a) Perfil de BS&W, b) Perfil de diámetro de partícula.

Posterior a la predicción los perfiles de concentración de agua y tamaño de partícula se procedió a realizar una verificación del GB-CxxB, día a día en un mes de operación, obteniendo los resultados mostrados en la Tabla 2.

Tabla 2 Resultados obtenidos equipo GB-CxxB

Día	Caudal inicial (BFPD)	BS&W inicial (%)	Temperatura (°F)	Caudal final (BFPD)	BS&W final real (%)	BS&W final programa (%)	dp final (µm)	Tiempo de coalescencia (min)	Nivel de interface (mm)	Nivel total (mm)
1	6997,62	70,50	182	1943	0,60	0,58	302	0,0396768	4712	8160
2	5443,55	66,80	181	1820	0,70	0,82	341	0,0413883	4700	8100
3	4932,00	63,20	185	1826	0,60	0,55	295	0,0412523	4682	8080
4	5126,00	64,50	184	1831	0,60	0,60	304	0,0419359	4680	8150
5	7330,00	75,70	183	1792	0,60	0,57	301	0,0374247	4677	8100
6	8188,32	78,60	179	1770	1,00	1,12	380	0,0384390	4654	8080
7	6160,77	71,00	180	1792	0,30	0,44	278	0,0398654	4700	8150
8	4569,78	62,00	174	1747	0,60	0,57	310	0,0458995	4645	8100
9	6066,00	67,10	170	2010	0,70	0,66	329	0,0447293	4712	8140
10	5359,48	63,00	164	1999	0,80	0,84	366	0,0517826	4541	8140
11	4989,60	60,00	173	2016	1,00	1,12	389	0,0494174	4647	8160

12	5031,96	61,50	171	1949	0,60	0,66	329	0,0468773	4726	8140
13	5198,72	62,60	165	1960	0,80	0,77	353	0,0490937	4703	8140
14	5080,48	61,30	167	1982	0,80	0,96	378	0,0541883	4397	8160
15	6077,28	66,70	169	2038	0,70	0,70	337	0,0450686	4753	8160
16	5969,99	66,80	168	1994	0,60	0,62	326	0,0480129	4541	8160
17	3593,71	49,00	162	1842	0,50	0,53	315	0,0651665	4350	8170
18	5261,67	61,30	171	2061	1,20	1,27	409	0,0504606	4588	8150
19	5237,09	61,40	170	2044	1,10	0,94	371	0,0508803	4537	8160
20	5120,21	62,00	168	2010	3,20	3,19	561	0,0575437	4432	8160
21	11466,60	83,00	167	1971	1,10	1,23	411	0,0426556	4571	8150
22	7644,95	74,10	170	1994	0,70	0,71	338	0,0438696	4580	8160
23	5720,96	69,00	167	1786	0,70	0,75	348	0,0454414	4705	8160
24	8281,67	79,40	174	1725	1,10	1,06	380	0,0394417	4728	8150
25	6431,69	69,00	168	2016	1,10	0,92	371	0,0404982	5084	8160
26	5756,68	65,00	166	2027	0,60	0,58	321	0,0484300	4613	8150
27	5244,66	62,00	170	2005	0,60	0,54	309	0,0489614	4580	8160
28	4893,20	58,00	168	2078	1,10	1,12	396	0,0540236	4549	8160
29	4702,83	57,20	170	2027	0,70	0,70	337	0,0520263	4589	8160

La Tabla 2 muestra, las condiciones de operación y los resultados obtenidos por el modelo, además de los tiempos de coalescencia necesarios para que se diera dicha separación, estos tiempos son los requeridos para generar un cambio en el diámetro de partícula y fueron obtenidos mediante iteraciones manuales. Se puede evidenciar, y como se observa en la Figura 5, que el programa realiza una predicción cercana a la realidad del BS&W final. Además, se puede observar que los tiempos de coalescencia tienen el comportamiento esperado, siendo mayores cuando las temperaturas son bajas, debido a que la viscosidad del crudo aumenta, lo que incrementa las fuerzas de rozamiento que se oponen a la sedimentación del agua.

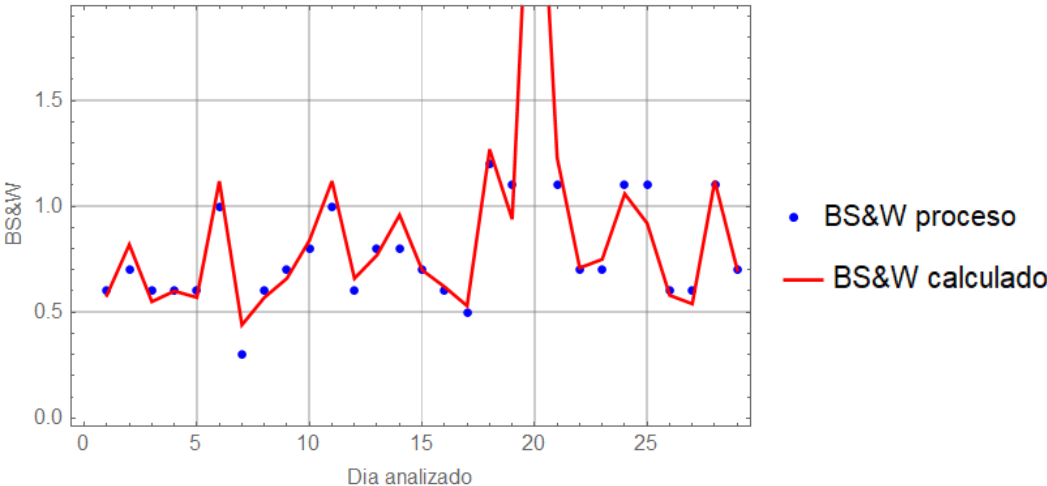


Figura 5 Comparación separación final real y datos calculados en el tanque GB-CxxB

Luego de obtener los perfiles deseados, surgió la inquietud en cuanto a que viscosidad se debería usar realmente para modelar el tanque, si como se había hecho previamente y como lo sugiere Arnold (2008), usando la viscosidad del crudo, o si era mejor usar la viscosidad de emulsión, ya que ésta cambia a medida que el BS&W cambia. De lo cual se obtuvieron los datos y comportamientos mostrados en la Tabla 3, Figuras 6a y 6b.

Tabla 3 Resultados obtenidos equipos gunbarrel

GUNBARREL	Caudal inicial (BFPD)	BS&W inicial (%)	Temperatura (°F)	Caudal final (BFPD)	BS&W final real (%)
GB-JxxC	5543	60	170	2224	0,3
GB-CxxA	6001,59	55,9	180	2660	0,5
GB-CxxB	5926,81	65,92	172	1932,93	0,9
GB-JxxB	22070	60	170	8854	0,3

GUNBARREL	BS&W final programa (%) SEM	BS&W final programa (%) CEM	Diámetro de partícula final (µm) SEM	Diámetro de partícula final (µm) CEM	Tiempo de coalescencia (min) SEM	Tiempo de coalescencia (min) CEM
GB-JxxC	0,31	0,29	256	252	0,0505612	0,0797744
GB-CxxA	0,53	0,50	295	290	0,0398581	0,0620015
GB-CxxB	0,94	0,87	368	361	0,0462534	0,0761673
GB-JxxB	0,38	0,3	275	255	0,0642069	0,102621

Como se puede ver en la Figura 6a, el comportamiento de la sedimentación es más rápida al inicio, lo que puede corresponder a la remoción abrupta del agua libre en comparación al comportamiento que se tenía al usar la viscosidad del crudo constante (Figura 4a). Además, se aprecia un proceso en general más lento, evidenciado en los tiempos de coalescencia (Tabla 3), que son mayores cuando se considera la viscosidad de la emulsión, de la misma forma como se explicó con anterioridad al tener mayores viscosidades.

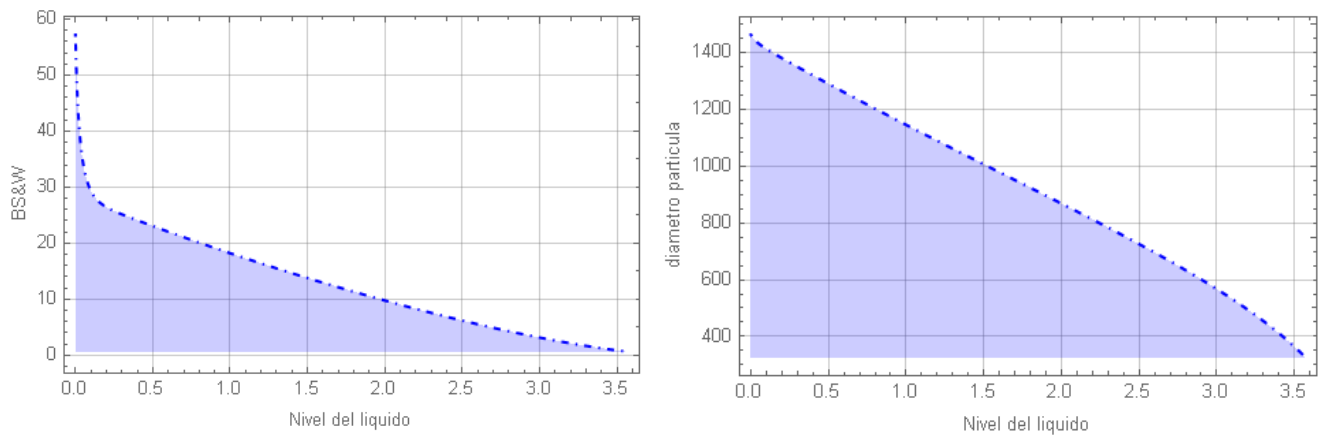


Figura 6. Perfiles de BS&W y diámetro de partícula en función de la altura del líquido en el colchón de crudo – GB-CxxB – día de operación 29 – Modelo Viscosidad de emulsión. a) Perfil de BS&W, b) Perfil de diámetro de partícula.

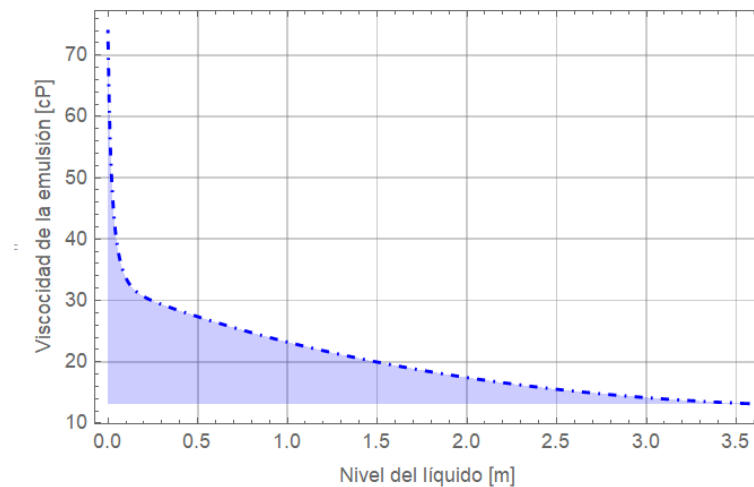


Figura 7. Gradiente de viscosidad en el tanque GB-CxxB – día de operación 29 – Modelo Viscosidad de emulsión.

Por otra parte, se observa que la variación del tamaño de partícula respecto al nivel en el colchón de crudo (Figura 6b), es un poco más uniforme en comparación a tener una viscosidad constante, y no corresponde a lo que se esperaría en el primer intervalo de longitud, en el que se presentó una disminución abrupta de concentración como la observada en la Figura 6a. Esto puede deberse a que, en el modelo, las partículas experimentan cambios muy fuertes en la viscosidad del medio como se puede ver en la Figura 7, lo que aumenta la resistencia para que ocurra la separación y por ende se producen cambios más pequeños en la velocidad de sedimentación.

Conclusiones

Se obtuvieron, mediante el modelo, resultados precisos que concordaban con los datos de salida reales en cuanto a remoción de agua, además de poder predecir un comportamiento del tamaño de la partícula y de la separación a través del colchón de crudo, correspondientes con lo que se esperaba.

Al comparar la remoción de agua predicha por los modelos con viscosidad de crudo constante y con viscosidad de emulsión, se encuentra una predicción similar, indicando que no hay diferencia apreciable en la remoción de salida bajo estos dos escenarios de cálculo. Sin embargo, desde el punto de vista de los perfiles de remoción de agua a lo largo del colchón de crudo, se nota una diferencia sustancial en la remoción lograda en la zona inferior del colchón y en la velocidad de sedimentación del proceso considerando viscosidad de emulsión, que se atribuye a las mayores viscosidades que implica este escenario de cálculo; no obstante, se requiere validación experimental de los perfiles predichos para juzgar la calidad de cada modelo.

Recomendaciones

Se recomienda para trabajos futuros, la realización de experimentación enfocada en establecer el perfil de separación de agua, así como el perfil de diámetros de partícula en la zona del colchón de crudo, con el fin de validar los comportamientos predichos al utilizar la consideración de viscosidad constante y viscosidad de emulsión.

Se recomienda hacer la inclusión del efecto de una posible adición química, cómo lo son los desemulsificantes, en el modelo diferencial para establecer su efecto en los perfiles de separación de agua.

Por último, se recomienda, encontrar una ecuación auxiliar que permita definir los tiempos de coalescencia de forma diferencial.

Bibliografía

Agencia Nacional de Hidrocarburos (2018). *PRODUCCIÓN FISCALIZADA DE PETRÓLEO POR CAMPO EN SUPERFICIE (BARRILES PROMEDIO POR DIA CALENDARIO - BPDC)*.

Colombia: Recuperado de: <http://www.anh.gov.co/Operaciones-Regalias-y-Participaciones/Sistema-Integrado-de-Operaciones/Documents/Produccion-fiscalizada-crudo-2018-a-publicar-06082018.xlsx>

Arnold K, Stewart M (2008) *Surface Production Operations: Design of Oil Handling Systems and Facilities*. Estados Unidos: Elsevier. pp 352, 426, 526.

Bradley H, Gipson F, Mortada M, Odeh A, Raymer L, Sizer P, Smith G (1992) *Petroleum Engineering Handbook*. Estados Unidos: Society of Petroleum Engineers. pp 19-20

Cheremisinoff N (2002) *HANDBOOK OF WATER AND WASTEWATER TREATMENT TECHNOLOGIES*. Estados Unidos: Butterworth-Heinemann. pp 270

Nuclear Energy Agency (23 septiembre de 2005) USCD1227 LSODA. Recuperado de: <http://www.oecd-nea.org/tools/abstract/detail/uscd1227>.

Peñuela J (mayo 2017), *Crudos pesados: la realidad del sector hidrocarburos de Colombia*. VirtualPRO: Recuperado de: <https://www.revistavirtualpro.com/editoriales/20170501-ed.pdf>

Lake L (2007) *Petroleum Engineering Handbook*. Estados Unidos: Society of Petroleum Engineers. III-25

Santos R, Loh W, Bannwart A, Trevisan O. AN OVERVIEW OF HEAVY OIL PROPERTIES AND ITS RECOVERY AND TRANSPORTATION METHODS. Brasil: *Brazilian Journal of Chemical Engineering*. Vol. 31, No. 03, pp. 571 - 590, July - September, 2014 [dx.doi.org/10.1590/0104-6632.20140313s00001853](https://doi.org/10.1590/0104-6632.20140313s00001853).