

## EVALUACIÓN COMPUTACIONAL DEL PROCESO DE FORMACIÓN DE EMULSIONES CRUDO EN AGUA EMPLEANDO MEMBRANAS MICROPOROSAS

*Elizabeth Rincón<sup>1\*</sup>, Natalia López<sup>2</sup>, Mauricio Giraldo<sup>3</sup>*

1, 2: Estudiante IQ, Universidad Pontificia Bolivariana. Medellín, Colombia

3: IM, PhD, Universidad Pontificia Bolivariana. Medellín, Colombia

\* Contacto: elirincon.p@gmail.com

### RESUMEN

Este trabajo presenta la formación de una emulsión crudo en agua empleando una membrana con tamaño de poro de 10 micrómetros. Los resultados muestran que para una velocidad de fase continua de 0.03 m/h y una presión a través de la membrana de 150 kPa, se obtiene un tamaño de gota de 1.50  $\mu\text{m}$ . Es así como para producir 1 gota/2.8 h-poro se requiere de 0.042 kW·h, un 96.6% menos con respecto al consumo energético que se necesita empleando un sistema rotor estator para producir la emulsión.

**Palabras Clave:** *Emulsión, Membranas microporosas, Simulación numérica, Crudo pesado, Costo energético*

### ABSTRACT

This work presents an oil/water emulsification process using a membrane with a pore size of 10 microns. The results show that it is necessary a continuous phase velocity of 0.03 m/h and transmembrane pressure of 150 kPa to obtained a droplet size of 1.50  $\mu\text{m}$ . This is how 0.042 kW·h are required to produce 1 drop/2.8 h-pore, which represents 96.6% less energy compared to the one needed using a rotor-stator system to produce the emulsion.

**Keywords:** *Emulsion, Microporous membranes, Numerical simulation, Heavy oil, Energy cost*

### 1 INTRODUCCIÓN

El transporte del crudo se ha convertido en una de las operaciones que tienen mayor impacto en la cadena productiva del petróleo y su incorporación a los mercados de la energía presenta desafíos importantes que requieren de avances tecnológicos en dicho campo. Hoy en día los oleoductos en Colombia están en condiciones de transportar alrededor de 900.000 barriles diarios que generan un costo aproximado por bombeo de US\$3'000.000 al día [1], debido a viscosidades del crudo pesado mayores a 10<sup>3</sup> cP a 298.15 K, grados API menores a 20° y las condiciones geográficas propias del país. Como alternativas para mejorar la operación del transporte de crudo pesado durante los últimos años se ha evaluado la reducción de la viscosidad por calentamiento del crudo o de la tubería, la dilución del crudo con hidrocarburos líquidos más livianos o alcoholes y la reducción de la viscosidad a partir de la formación de emulsiones crudo en agua [2].

En comparación con métodos convencionales para la formación de emulsiones basados en agitación mecánica, tales como la homogenización y los sistemas rotor-estator, cuando se emplea la emulsificación con membranas se requiere menos energía para producir gotas de un tamaño determinado. El costo energético se puede ver evidenciado en el costo de producción de  $1\text{m}^3$  de emulsión, que para un sistema rotor de alta cizalladura [3] es de \$427, esto teniendo en cuenta el precio de un kilowatio-hora para la industria colombiana; la emulsión realizada con membranas es diferente porque las pequeñas gotas son formadas directamente en la superficie de la membrana microporosa, por lo que el consumo de energía en el proceso es menor, alcanzando costos de alrededor de \$8 por metro cúbico de emulsión producida [4].

## 2 METODOLOGÍA

### 2.1 Definición del sistema

La fase dispersa pasa a través de los microporos de la membrana formando el dominio denominado  $\Omega_{\text{int}}$ , mientras la fase continua fluye a lo largo de la superficie de ésta, a través del dominio llamado  $\Omega_e$ . Se definen como fronteras de la fase dispersa las paredes del poro ( $S_w$ ) y la superficie por donde ingresa la fase dispersa ( $S_{\text{int}}$ ). Debido a la diferencia de presión a través de la membrana, se forman las gotas en los poros de la membrana y entran en contacto directo con la fase continua, generándose una interfase entre los dos fluidos denominada  $S_d$ , la cual pertenece a las fronteras de la fase dispersa.

### 2.2 Ecuaciones gobernantes

Tanto el flujo de la fase dispersa como de la fase continua deben satisfacer las ecuaciones de conservación de momento y continuidad, las cuales en el caso de un bajo número de Reynolds (comúnmente las escalas de velocidad y altura de los fluidos en este tipo de aplicaciones aseguran estas condiciones) se reducen al sistema de ecuaciones de Stokes:

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_j} = 0 \quad (2)$$

Donde

$$\sigma_{ij} = \begin{cases} -p\delta_{ij} + \mu_e \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) & x \in \Omega_e \\ -p\delta_{ij} + \mu_{\text{int}} \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) & x \in \Omega_{\text{int}} \end{cases} \quad (3)$$

En las ecuaciones (1)-(3),  $\vec{u}$  es la velocidad,  $p$  la presión,  $\delta_{ij}$  el delta de Kronecker,  $\mu_e$  y  $\mu_{\text{int}}$  es la viscosidad de los fluidos externo e interno respectivamente. Dado que  $S_d$  es una frontera

compartida, son necesarias condiciones de velocidad y tensión superficial tal como se muestran a continuación:

$$[\vec{u}]_{S_d} = 0 \quad (4)$$

$$[\sigma_{ij}n_j]_{S_d} = \gamma n_i \frac{\partial n_k}{\partial x_k} \quad (5)$$

Donde  $[\ ]_{S_d}$  denota el límite a través de la superficie de la gota  $S_d$  desde  $\Omega_e$  hasta  $\Omega_{int}$ . En las ecuaciones (4) y (5),  $\gamma$  es la tensión superficial,  $n$  es el vector unitario normal hacia afuera, relativo a  $\Omega_{int}$ , y  $\partial n_k / \partial x_k$  es la curvatura de la superficie.

Adicionalmente, en la interfase del fluido se debe satisfacer la siguiente condición cinemática:

$$\frac{d\vec{x}(\xi)}{dy} = \vec{u}(\xi) \quad (6)$$

Donde  $(\xi)$  es la velocidad de la interfase del fluido en el punto  $\xi$ .  $\xi$  representa un punto en cualquier superficie del problema [5].

Las ecuaciones anteriores son implementadas dentro del programa de simulación con el fin de modelar el proceso de formación de las gotas y todas las interacciones que tienen lugar durante dicho proceso, las cuales involucran tanto los dominios de las fases continua y dispersa como sus respectivas fronteras.

### 2.3 Desarrollo e implementación del modelo

La simulación numérica se realiza mediante el programa de simulación desarrollado por Giraldo, Mauricio, el cual emplea el método de elementos de frontera para la simulación de un fluido bifásico bajo condiciones de flujo Stokes. Dentro de la implementación de la herramienta computacional se emplea un mecanismo de avance en el tiempo de incrementos fijos con un Método de Runge Kutta orden dos. Para mayor detalle acerca de la implementación del modelo matemático referirse al artículo publicado por Giraldo et al. [5].

## 3 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

A partir del tiempo  $t=0$  s se da inicio al paso de crudo a través de la membrana, estudiándose específicamente un poro de ésta y la formación de una gota de crudo sobre el mismo. A partir de este paso de tiempo la superficie de la gota que se forma sobre el poro estudiado comienza a crecer, moviéndose a una mayor velocidad al inicio de la simulación y disminuyendo su velocidad para pasos de tiempo posteriores; esto debido a que un flujo de entrada constante creará un mayor movimiento en una superficie pequeña, mientras que el efecto de una superficie más grande induce a una velocidad superficial casi nula a medida que avanza la simulación. Este comportamiento se observa en la Figura donde se expone el avance temporal de la simulación mostrando tres espacios de tiempo igualmente distantes.

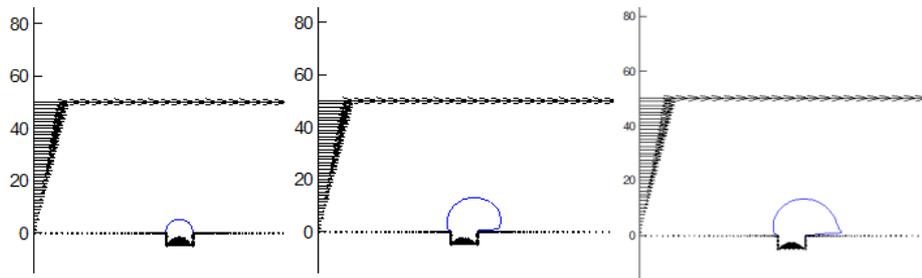


Figura 1a. Caso de estudio en  $t=0$  s,  $t=7000$  s y  $t=14000$  s

En el tiempo de simulación  $t=7000$  s se evidencia una forma de la gota más esférica pero a medida que avanza el tiempo ésta se deforma especialmente hacia el lado inferior derecho; este comportamiento puede atribuirse a la interacción de las superficies con la gota y a la velocidad de la fase continua, ya que la presencia de la pared inferior no permite que la gota se mueva hacia abajo y la velocidad que lleva la fase continua empuja la misma hacia dicha dirección.

Para el tiempo  $t=14000$  s se observa un detenimiento en el crecimiento de la gota central, que de aquí en adelante se llamará núcleo, pues a partir de ella se empiezan a generar las gotas que dan lugar a la emulsión crudo en agua deseada, en este tiempo se muestra el núcleo completamente formado justo antes de que comience a tener lugar la formación de la primera gota a desprender. En el tiempo  $t=24000$  s se tiene la gota completamente formada y a punto de desprenderse, lo cual se evidencia en el estrangulamiento del cuello que la une al núcleo como se muestra en la Figura .

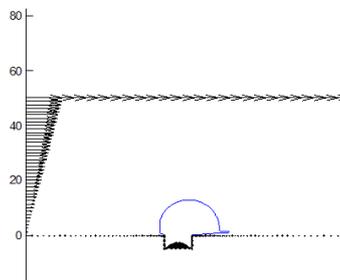
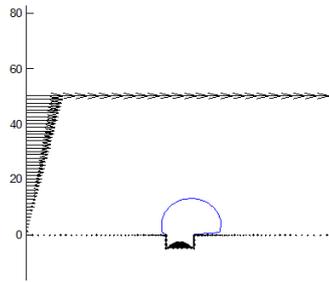


Figura 1b. Caso de estudio en  $t=24000$  s

En la Figura puede observarse que, posterior al desprendimiento de la primera gota, se tiene de nuevo el núcleo preparado para dar lugar a la formación de las próximas gotas que producirán la emulsión. La formación de las gotas y por ende de la emulsión continúa a una tasa de producción de 1 gota/2.8 h-poro, definida a partir del tiempo transcurrido entre el momento en el que el núcleo se encuentra completamente formado y el momento en que se desprende la primera gota de crudo.



**Figura 1c.** Caso de estudio en  $t=26440$  s

Las gotas presentan un diámetro promedio de  $1.50 \mu\text{m}$ , que se obtiene al realizar una integración numérica sobre los puntos que representan el área limitada por la gráfica que describe la gota; el diámetro cumple con los resultados esperados, ya que de acuerdo a Hasan et al. la emulsificación con membranas microporosas permite la producción de una fase monodispersa con un tamaño de gota promedio entre  $0.1$  y  $10 \mu\text{m}$  [6].

El diámetro obtenido se encuentra en el extremo mínimo de este rango, lo que puede relacionarse con la fuerza de tensión interfacial establecida en  $3.4 \text{ mN/m}$ . Schröder y Schubert han sugerido que la fuerza de tensión interfacial es una de las fuerzas esenciales que sujeta una gota a un poro y encontraron que gotas más grandes son producidas cuanto mayor sea la tensión interfacial de equilibrio [7], por lo que en este caso al tenerse una tensión interfacial baja se obtienen gotas de un tamaño menor.

Además las emulsiones realizadas empleando instrumentos como molinos coloidales, discos dentados, máquinas dispersantes y homogenizadores de alta presión muestran una considerable polidispersidad con una distribución de tamaño de las gotas usualmente entre  $0.1$  y  $100 \mu\text{m}$  [8], mientras que en este trabajo se alcanza una distribución de tamaño que se puede ubicar dentro de la distribución conocida como Rosin-Rammler que se encuentra entre  $0.5$  y  $1.8 \mu\text{m}$ . Este tamaño de gotas permite obtener una emulsión estable durante un periodo mayor de tiempo, comparado con una emulsión formada utilizando otros métodos como lo indican Laurencio y Delgado en su investigación sobre las propiedades reológicas de emulsiones de petróleo pesado en agua [9].

Para calcular la potencia requerida para producir  $1 \text{ m}^3$  de emulsión utilizando una membrana microporosa, se parte de la diferencia de presión a través de la membrana y el caudal de la fase continua; éste último se determina a partir de los resultados de velocidad para la fase dispersa en cada paso de tiempo, entregados por la simulación. De éste modo, utilizando un caudal de  $0.056 \mu\text{m}^3/\text{s-poro}$ , se requiere una potencia de  $8.36 \times 10^{-15} \text{ W/poro}$  para obtener una caída de presión a través de la membrana de  $150 \text{ kPa}$  necesaria para la formación de las gotas de crudo en la fase continua. Utilizando estos parámetros de flujo y presión, y empleando una membrana microporosa, producir  $1 \text{ m}^3$  de emulsión representa un costo de  $\$14.58$  teniendo en cuenta un precio aproximado de  $\$350/\text{kW}\cdot\text{h}$  para la industria colombiana [10]. Lo anterior, se ajusta a los costos mencionados por Joscelyne & Trägårdh en su investigación sobre emulsificación con membranas [4], donde, utilizando el precio del kilowatio-hora para la industria colombiana, se obtienen para este método valores de alrededor de  $\$8/\text{m}^3$ .

Para un sistema rotor de alta cizalladura el costo energético [3] para producir  $1 \text{ m}^3$  es aproximadamente de  $\$427$ ,  $96.6\%$  más comparado con la emulsificación con membranas. El

costo de producción utilizando métodos tradicionales es mayor debido a que solo una fracción de la energía suministrada se utiliza en el rompimiento de las gotas, y hasta el 99.8% de la energía suministrada se pierde en forma de calor [11].

### **3 CONCLUSIONES**

Este trabajo presenta la formación de emulsiones empleando membranas microporosas como una de las alternativas de menor costo energético para disminuir la viscosidad del crudo y a su vez los costos en bombeo.

El tamaño final de las gotas es una función no sólo de las propiedades de los fluidos involucrados en la emulsión, sino también de las variables operacionales como la velocidad de la fase continua y la presión a través de la membrana.

Valores de 0.03 m/h y 150 kPa para la velocidad de la fase continua y la presión a través de la membrana respectivamente, generan una emulsión con un tamaño de gota 1.50  $\mu\text{m}$  a una tasa de producción 1 gota/2.8 h·poro con un costo energético de \$14.6/m<sup>3</sup> de emulsión.

### **4 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

1. ECOPETROL, "ECOPETROL", [Archivo página web], Recuperado el 14 de Agosto de 2012 de <http://www.ecopetrol.com.co/contenido.aspx?catID=411&conID=46112>.
2. Martínez, R., Mosqueira, M., Zapata, B., Mar-Juárez, E., Bernal, C., Clavel, J. & Aburto, J., "Transportation of heavy and extra-heavy crude oil by pipeline: A review", *Journal of Petroleum Science and Engineering*, Vol. 75, N° 3-4, p. 274-282, January 2011.
3. SieHeMechanical and Electrical, "InlineHigh-shearEmulsifier", [Archivo página web], Recuperado el 10 de Agosto de 2012 de [http://www.sieheindustry.com/en/Fluid-Machinery/Emulsifiers/Inline-High-shear-Emulsifier-\(Three-Stage\).html](http://www.sieheindustry.com/en/Fluid-Machinery/Emulsifiers/Inline-High-shear-Emulsifier-(Three-Stage).html).
4. Joscelyne, S. & Trägårdh, G., "Membrane emulsification – a literature review", *Journal of Membrane Science*, Vol. 169, N° 1, p. 107-117, April 2000.
5. Giraldo, M., Power, H. & Flórez, W., "Numerical simulation of the motion and deformation of a non-Newtonian shear-thinning drop suspended in a Newtonian circular Couette flow using DR-BEM", *Engineering Analysis with Boundary Elements*, Vol. 33, N° 1, p.93-104, 2009.
6. Hasan, S., Ghannam, M. & Esmail, N., "Heavy crude oil viscosity reduction and rheology for pipeline transportation", *Fuel*, Vol. 89, N° 5, p. 1095-110, May 2010.
7. Schröder, V. & Schubert, H., "Production of emulsions using microporous, ceramic membranes", *Colloids and Surfaces*, Vol. 152, N° 1-2, p. 103-109, July 1999.
8. Nakashima, T., Shimizu, M. & Kuzikazi, M. "Patent ICIM-92.", Switzerland Patent, 1991.



9. Laurencio, H. & Delgado, Y., “Propiedades reológicas de emulsiones de petróleo pesado en agua”, *Ingeniare: Revista Chilena de Ingeniería*, Vol. 16, N° 1, p. 244-249, Junio 2008.
10. Ramírez, M., Ávila, R. & Aguilar, M., “Tarifas y disponibilidad de energía eléctrica y gas natural en el sector industrial colombiano”, Reporte de la Coalición para la Promoción de la Industria Colombiana, Diciembre 2012.
11. Pérez, A., Cárdenas, A. & Bullon, J., "Emulsión con membranas", Mérida, Universidad Central, 2010.