

Influencia del biorreductor de viscosidad en el gradiente de presión en un ducto horizontal que transporta fluido no newtoniano

Edgardo Jonathan Suárez Domínguez

Correo electrónico:jsd@mics.edu.mx
Mexican Institute of Complex Systems, México

Artículo Original

Arturo Palacio Pérez

Correo electrónico:apalaciop@ii.unam.mx
Universidad Nacional Autónoma de México

Alejandro Rodríguez Valdés

Correo electrónico:vortexmx@gmail.com
Universidad Nacional Autónoma de México

Elena Izquierdo Kulich

Correo electrónico:elenaik@fq.uh.cu
Universidad de La Habana, Cuba

Resumen

Debido al incremento de producción de crudo pesado y extrapesado en México, ha sido necesario emplear productos químicos para facilitar el transporte del mismo en las tuberías del país. Se realizó un estudio experimental para analizar la influencia de un reductor de viscosidad de origen biológico (BRV), sobre el comportamiento reológico de un crudo pesado proveniente de la región norte de México, encontrándose que este exhibe un comportamiento no newtoniano viscoelástico, donde el incremento en la concentración del BRV conlleva una disminución de la consistencia y un incremento del orden del flujo, que con altas temperaturas se observó un comportamiento dilatante. A partir de estos resultados se estimaron las pérdidas de presión por fricción en un tubo horizontal, tanto para flujo monofásico como bifásico, encontrándose que en todos los casos el incremento en la concentración de BRV disminuye estas pérdidas.

Palabras claves: reología, crudo pesado, reductor de viscosidad

Recibido: 17 de septiembre del 2013

Aprobado: 18 de diciembre del 2013

INTRODUCCIÓN

Muchos procesos industriales se desarrollan a partir de una combinación de fluidos; en la industria petrolera la producción de crudo generalmente se acompaña de otras fases como agua, gas, o combinaciones de cualquiera de ellas, lo que es conocido como flujo multifásico [1]. El flujo bifásico se caracteriza por estar constituido por dos fases diferentes distinguibles entre sí. Entre los casos de flujo bifásico se pueden mencionar los sistemas dispersos como las emulsiones y las suspensiones, donde la presencia de

la fase dispersa en cada caso se considera habitualmente a través de una corrección a la viscosidad [2].

El BRV (bio-reductor de viscosidad) es un producto comercial compuesto por esteres de ácidos grasos e hidrocarburos de bajo peso molecular que se emplea para reducir la viscosidad del crudo [3]. El presente trabajo tiene como objetivos fundamentales los siguientes: estudiar el efecto del BRV en el comportamiento reológico de un crudo obtenido de un campo localizado en la zona norte de México y predecir la reducción del gradiente de presión por fricción

en un tubo horizontal en función de la concentración de BRV, tanto para flujo monofásico como para flujo bifásico líquido-gas. El mismo está estructurado de la siguiente forma: en una primera sección se presentan las ecuaciones y los modelos matemáticos que fueron utilizados para la caracterización reológica del crudo y el cálculo de las pérdidas de presión por fricción. Seguidamente se exponen y discuten los resultados experimentales relacionados con el efecto del BRV sobre la viscosidad aparente. Por último, se proponen y discuten los resultados predichos relacionados con la reducción de las pérdidas de presión por fricción en los ductos en presencia de BRV y, finalmente, se presentan las conclusiones.

MODELOS MATEMÁTICOS

La caracterización reológica de los crudos se llevó a cabo empleando el concepto de la viscosidad aparente η de acuerdo con el modelo potencial:

$$\eta = m(\gamma)^{n-1} \quad (1)$$

donde:

m [Pa.sⁿ]: Consistencia.

n : Orden del flujo.

γ : Gradiente de velocidad [s⁻¹].

Como es conocido, si el valor de n es igual a 1, el fluido es newtoniano y la viscosidad es independiente de la velocidad del flujo, si n es mayor que 1 el fluido es dilatante y γ se incrementa con γ y si n es menor que 1 el fluido es viscoelástico, donde η disminuye con γ [4, 5, 6].

Para el flujo monofásico las pérdidas de presión por fricción ΔP_f [Pa] se determinan a partir de la relación [7, 8]:

$$\Delta P_f = 2f\rho V^2 \frac{L}{D} \quad (2)$$

donde:

V [m.s⁻¹]: Velocidad del flujo.

ρ [kg.m⁻³]: Densidad.

L [m]: Longitud del tubo de diámetro.

D [m]: Factor de fricción de Fanning.

En régimen laminar:

$$f = \frac{16}{R_{e,NN}}, \quad R_{e,NN} \leq 2\,000 \quad (3)$$

mientras que en régimen turbulento:

$$\frac{1}{\sqrt{n^{-0,675}f}} = -4 \log \left[\frac{\varepsilon}{3,7D} + \frac{1,256}{R_{e,NN} \sqrt{n^{-0,675}f}} \right], \quad R_{e,NN} > 2\,000 \quad (4)$$

donde:

ε [m]: Rugosidad de la pared del tubo.

$R_{e,NN}$: Número de Reynolds para fluidos no newtonianos (6):

$$R_{e,NN} = \frac{8(0,5D)^n V^{2-n} \rho}{m} \left(\frac{n}{3n+1} \right)^n \quad (5)$$

Para el caso de flujo bifásico crudo-gas se empleó el método de Lockhart-Martinelli [9, 10], el cual se basa en determinar las caídas de presión por fricción para el líquido ΔP_{f_l} para el gas ΔP_{f_g} considerando que ambos circulan de forma independiente por el tubo, de tal manera que las pérdidas por fricción para flujo bifásico ΔP se estiman a partir de la relación [11]:

$$\Delta P = \Delta P_{f_l} (\Phi_l)^2 \text{ si } X = \left(\frac{\Delta P_{f_l}}{\Delta P_{f_g}} \right)^{0,5} \geq 1 \quad (6)$$

$$\Delta P = \Delta P_{f_g} (\Phi_g)^2 \text{ si } X = \left(\frac{\Delta P_{f_l}}{\Delta P_{f_g}} \right)^{0,5} < 1 \quad (7)$$

donde los parámetros Φ_l y Φ_g se determinan a través de las correlaciones empíricas:

$$\Phi_l = 1 + \frac{C}{X^2} + \frac{1}{X} \quad (8)$$

$$\Phi_g = 1 + CX + X^2 \quad (9)$$

La constante C que aparece en las ecuaciones (8) y (9) se determina de acuerdo con el régimen de flujo para el gas y para el líquido [11, 12], como se muestra en la tabla 1.

Líquido	Gas	C
Turbulento	Turbulento	20
Laminar	Turbulento	12
Turbulento	Laminar	10
Laminar	Laminar	5

La caída de presión por fricción para el gas, en un sistema isotérmico en el cual el efecto de la caída de presión sobre la densidad del gas puede considerarse despreciable, se determina a partir de las ecuaciones (2)-(5) estimando un comportamiento newtoniano ($n = 1$).

ANÁLISIS DE LA INFLUENCIA DEL BRV SOBRE LA VISCOSIDAD DEL CRUDO

La viscosidad aparente del crudo analizado, cuyas características se muestran en la tabla 2, fue determinada mediante un viscosímetro Brookfield Modelo DV-2 con sensibilidad del 1 % para diferentes valores de temperatura y concentración de BRV.

Los resultados de consistencia y orden de flujo obtenidos a partir de considerar el modelo de viscosidad aparente dado por la ecuación (1) se presentan en la tabla 3 y en la figura 1, donde se muestran las líneas de tendencia obtenidas mediante ajuste estadístico que indican la influencia del BRV sobre el orden y la consistencia.

El aumento de temperatura y de la concentración de BRV presentan una variación de menos del 2 % de la consistencia m y un incremento en el valor del orden n del flujo, para el caso a 25 y 60 °C. Para 80 °C, la variación es menor del 5 %.

Este comportamiento no newtoniano complejo, donde el BRV causa una disminución de la consistencia y un aumento del orden, induce a llevar a cabo una serie de simulaciones numéricas que permiten inferir el efecto de la concentración de BRV sobre el gradiente de presión por fricción, y poder predecir la factibilidad de su empleo para disminuir los costos de extracción y/o transporte de crudo.

ρ [kg.m ³]	998
% asfaltenos	25,8
% parafinas	10,9

BRV	0 %	0,50%	1 %	2 %	3 %
T = 25 °C					
m [Pa.s ⁿ⁻¹]	46,718	43,056	36,217	24,995	19,539
n	0,952	0,940	0,963	0,968	0,960
R^2	0,967	0,974	0,950	0,941	0,872
T = 60 °C					
m [Pa.s ⁿ⁻¹]	1,981	1,788	1,614	1,421	1,145
n	0,980	0,971	0,980	0,980	0,980
R^2	0,942	0,829	0,942	0,963	0,873
T = 80 °C					
m [Pa.s ⁿ⁻¹]	0,468	0,418	0,402	0,330	0,272
n	1,062	1,064	1,070	1,092	1,121
R^2	0,963	0,936	0,956	0,949	0,955

EFFECTO DE LA CONCENTRACIÓN DE BRV SOBRE EL GRADIENTE DE PRESIÓN POR FRICCIÓN

Para determinar las pérdidas de presión por fricción se consideró un tubo de 1" (0,254 m) de diámetro, rugosidad de la pared del tubo de 0,001 m y una velocidad de flujo de 0,1 m.s⁻¹. El comportamiento del gradiente de presión $\delta P = \Delta P/L$ para 0 % de BRV y diferentes temperaturas se muestra en la tabla 4, donde se puede apreciar que δP disminuye apreciablemente con el incremento de la temperatura.

El efecto del BRV sobre las pérdidas de presión se cuantifica a través de la reducción en el gradiente de presión R_p , que mientras sea menor indica una mayor reducción en la caída de presión debido a la fricción y a las fuerzas viscosas, y el cual se determina como:

$$R_p = \frac{\delta P(x)}{\delta P(0)} \quad (10)$$

donde:

$\delta P(x)$: Gradiente de presión a la concentración x de BRV.

$\delta P(0)$: Gradiente correspondiente a 0% de BRV, ambos calculados a la misma temperatura.

	Temperatura		
	25 °C	60 °C	80 °C
δP	3,161	0,135	0,035

En la figura 2 se muestran los resultados obtenidos, donde se puede observar que R_p siempre disminuye con el incremento de BRV, conservándose dicho comportamiento a diversas temperaturas.

Estos resultados indican que la disminución de la consistencia del crudo con respecto a la concentración de BRV, es lo que propicia este decremento en el gradiente de presión, mientras que el incremento del orden de flujo que se presenta en este sistema aparentemente no afecta de forma significativa su comportamiento.

Para el caso del flujo bifásico líquido-gas se consideró un gas cuyas propiedades se muestran en la tabla 5.

De forma semejante a como se procedió para el caso de flujo monofásico, el efecto del BRV sobre la reducción de las pérdidas por fricción se cuantifica a través del parámetro:

$$R_p = \frac{\delta P_b(x)}{\delta P(0)} \quad (11)$$

donde:

δP_b : Gradiente de presión para flujo bifásico para la concentración de BRV.

$\delta P(0)$: Gradiente de presión para flujo monofásico a 0 % de BRV, ambos considerados a la misma temperatura.

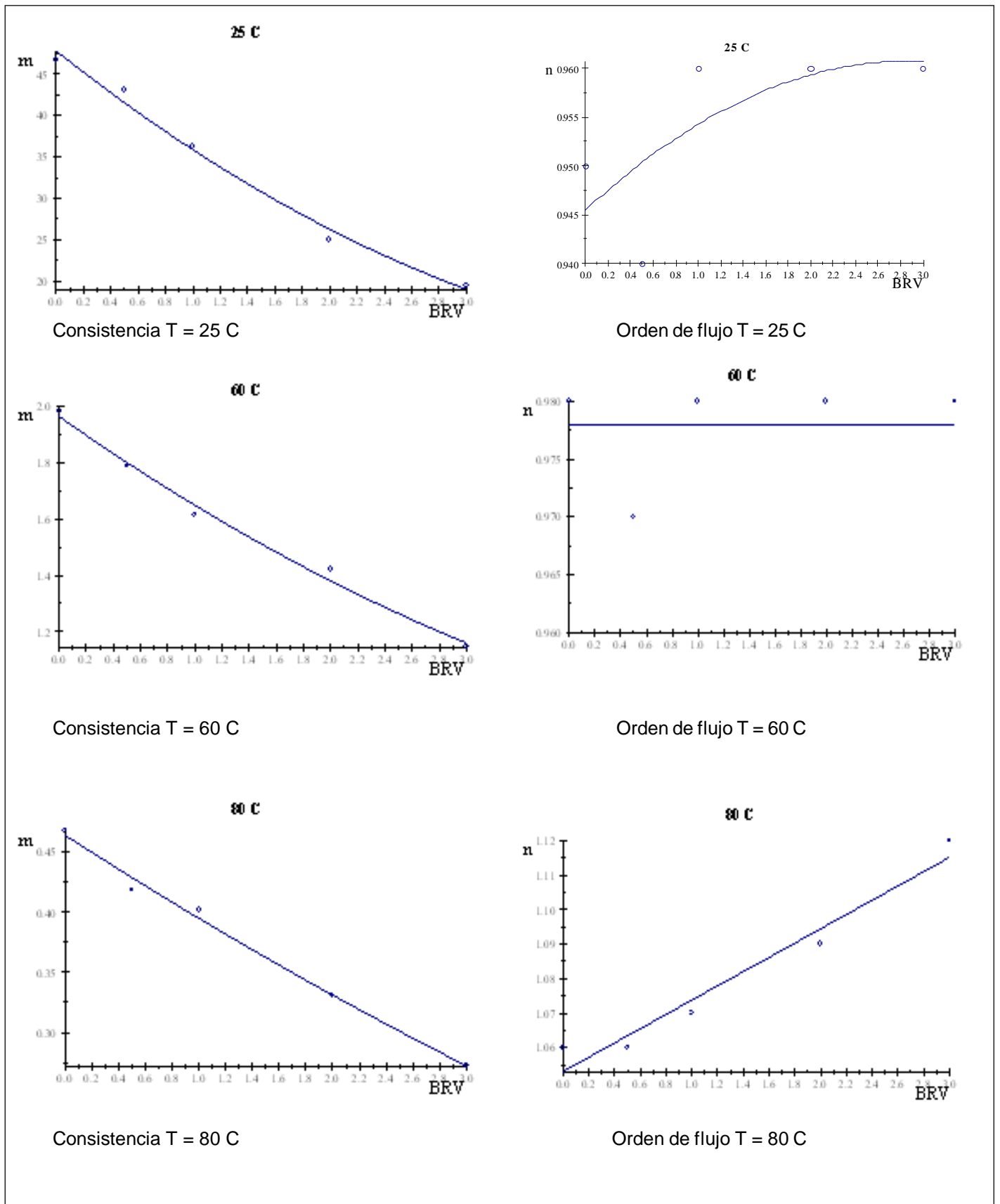


Fig. 1. Comportamiento experimental y líneas de tendencia ajustadas del efecto de la concentración de BRV sobre la consistencia m y el orden de flujo n

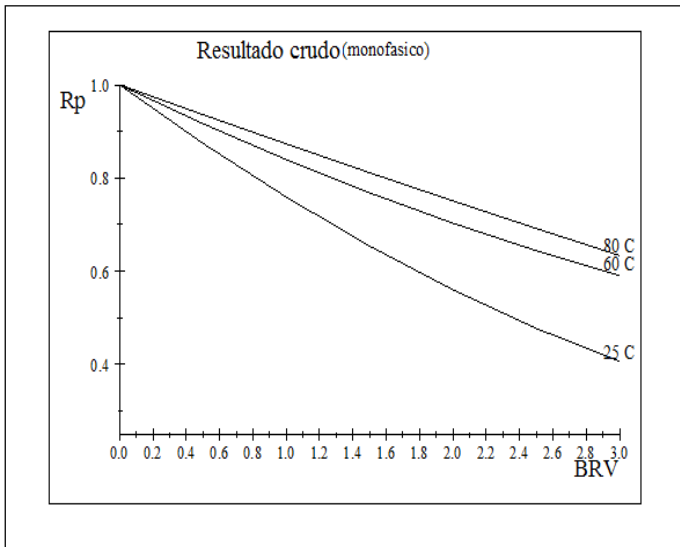


Fig. 2. Comportamiento simulado de la reducción en el gradiente de presión R_p con respecto a la concentración de BRV para diferentes valores de temperatura

Tabla 5. Propiedades del gas considerado para flujo bifásico	
Componente	% molar
nitrógeno	0,65
dióxido de carbono	5,44
ácido sulfhídrico	0,70
metano	42,91
etano	12,66
propano	14,75
iso-butano	1,94
butano	7,19
iso-pentano	3,67
pentano	4,65
hexanos	5,40
$Z = 0,9577$	
$\mu = 0,2 \times 10^{-4} \text{ [Pa.s}^{-1} \text{]}$	

Los resultados obtenidos se muestran en la figura 3, donde el porcentaje correspondiente a cada caso se refiere al porcentaje en volumen de gas en el ducto.

En este caso se aprecia que la reducción de la presión, que se manifiesta en una disminución de R_p , se incrementa tanto con la concentración de BRV como con el incremento del porcentaje volumétrico del gas.

Estos resultados teóricos indican que la disminución de la consistencia del fluido causada por el BRV en el flujo bifásico tiene un efecto más significativo que el incremento del orden, por lo que se podría inferir que el BRV puede ser utilizado como reductor de pérdidas de presión por fricción tanto en flujo monofásico como en bifásico.

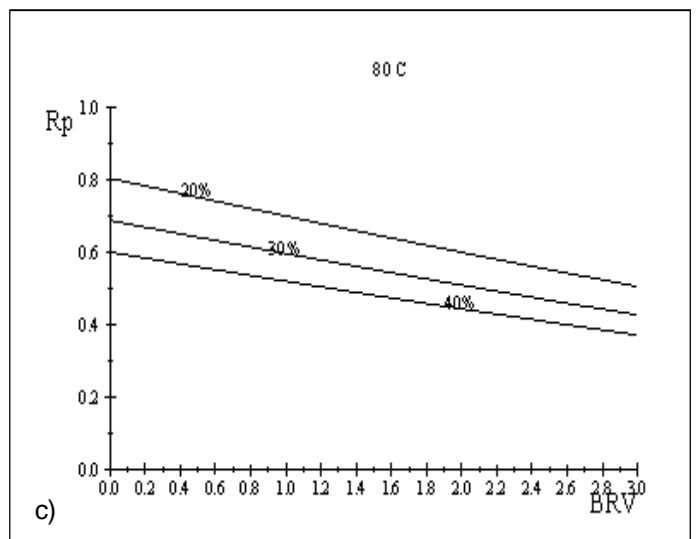
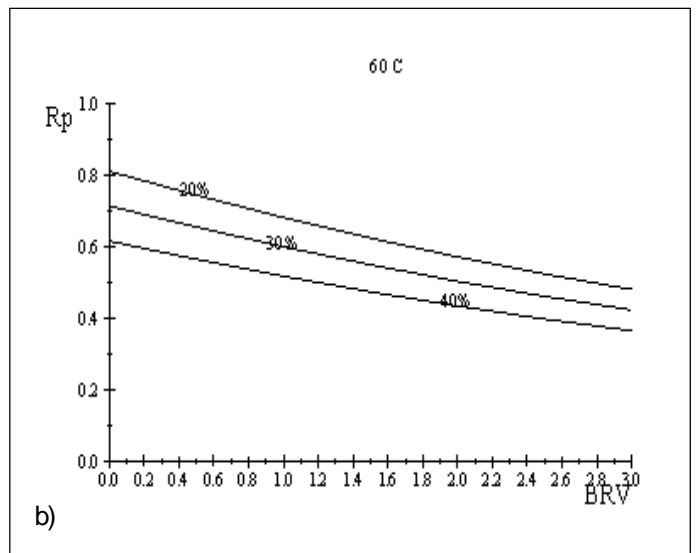
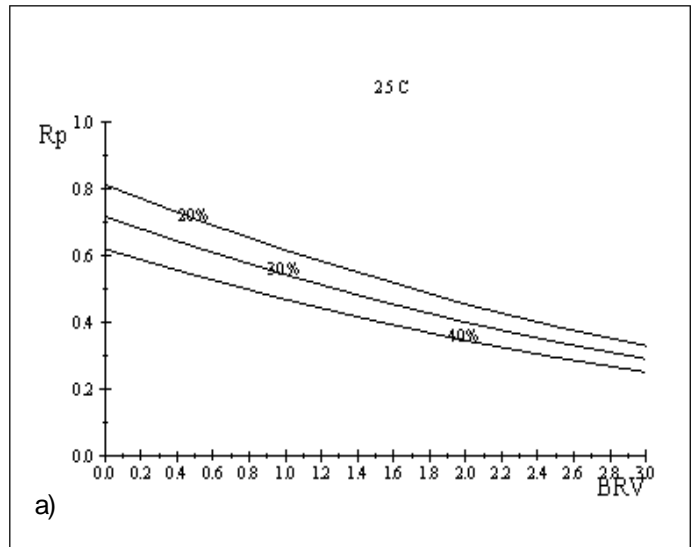


Fig. 3. Efecto del BRV sobre las pérdidas de presión por fricción en el crudo estudiado para flujo bifásico para diferentes porcentajes de volumen del gas

CONCLUSIONES

Los resultados experimentales obtenidos relacionados con el efecto del BRV sobre el comportamiento reológico del crudo estudiado en este trabajo, que presenta características viscoelásticas para 0% de BRV, mostraron que la consistencia del crudo disminuye con el incremento en la concentración del BRV, mientras que el orden de flujo se eleva, causando que a altas temperaturas exhiba un comportamiento dilatante. Basado en lo anterior, se realizaron cálculos de los gradientes de presión por fricción en un ducto horizontal para determinar si el BRV es apropiado para la reducción de estas caídas de presión durante los procesos de extracción y transporte de este tipo de crudos. Los resultados indican que la reducción de presión se incrementa a medida que aumenta la concentración de BRV, tanto para flujo monofásico como bifásico, lo cual sugiere que el BRV puede ser utilizado a nivel industrial en los procesos de extracción de crudo, aunque se requieren pruebas en planta piloto para realizar una confirmación experimental.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la Compañía Mexicana Geo Estratos S.A. de C.V. por el auspicio a esta investigación.

REFERENCIAS

1. **BRANDO, Valter Antonio; MANSOORI, G. Ali et al.** "Asphaltene flocculation and collapse from petroleum fluids". *Journal of Petroleum Science and Engineering*. vol. 32, núm. 2-4, pp. 217-230, 2001.
2. **RIAZI, M. R.** *Characterization and properties of petroleum fractions*. ASTM international, 2005, 400pp. ISBN 0-8031-3361-8.
3. **GONZÁLEZ DÁVILA, Vicente; SUÁREZ DOMÍNGUEZ, Edgardo Jonathan.** "Study of Sustainable Viscosity Reduction for Extra-Heavy Crude Oil: BRV". *ENERLAC*. vol. 4, pp. 142-150, 2012. Disponible en Web: http://biblioteca.olade.org/iah/fulltext/Bjnbr/v32_2/hm000022.pdf. Consulta julio 2013.
4. **BARNES, A.; HUTTON, J. F.; WALTERS, K.** *An introduction of rheology*. Elsevier Amsterdam, 1989, 210 pp. ISBN:978-0-444-87140-4.
5. **TANNER, R. I.; WALTERS, K.** *Rheology: An historical perspective*. Elsevier Amsterdam, 1998, 286 pp. SBN:978-0444829467.
6. **BIRD, R. B.; STEWART, Warren. E.; LIGHTFOOT, Edwin. N.** *Transport Phenomena*. 2nd ed. New York: John Wiley & Sons, 2006. ISBN:978-047011539.
7. **NOVELLA COSTA Enrique.** *Ingeniería Química: Flujo de fluidos*, Ed. Alhambra Universidad, 1985, 432 pp.
8. **DARBY, Ron.** *Chemical Engineering Fluid Mechanics*. Marcel Dekker, 2001, 575 pp. ISBN: 0-8247-0444-4.
9. **BRILL, James P.; BEGGS, Dale.** *Two-phase flow in pipes*. 6th edition, January, 1991.
10. **DUKLER, A. E.** "Frictional pressure drop in two-phase flow: B. an approach through similarity analysis". *A.I.Ch.E Journal*. vol. 10, núm. 1, pp. 44-51, January, 1964.
11. **HEMEIDA, Adel, SUMAIT Faisal.** "Improving the Lockhart and Martinelli Two-Phase Flow Correlation by SAS". *Journal of Engineering Science*. vol. 14. pp. 423-434. 1988.
12. **GAFONOVA, O.; YARRANTON, H.** "The Stabilization of Water-in-Hydrocarbon Emulsions by Asphaltenes and Resins". *Journal Of Colloid And Interface Science*, vol. 241, pp. 469-478, 2001.

AUTORES

Edgardo Jonathan Suárez Domínguez

Químico Industrial, Maestro en Ingeniería, Investigador, Mexican Institute of Complex Systems, Tamaulipas, México

Arturo Palacio Pérez

Ingeniero Mecánico-Electricista, Doctor en Ingeniería Mecánica Teórica y Aplicada, Profesor Investigador, Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de México, México

Alejandro Rodríguez Valdés

Ingeniero Mecánico-Electricista, Doctor en Ingeniería Mecánica Teórica y Aplicada, Profesor Investigador, Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de México, México

Elena Izquierdo Kulich

Ingeniera Química, Doctora en Ciencias Técnicas, Profesora, Facultad de Química, Universidad de La Habana, Cuba

Viscosity bio reducer Influence in a non-Newtonian fluid horizontal pipeline pressure gradient

Abstract

Due to increased production of heavy and extra heavy crude in Mexico, it has led to the necessity to use chemicals to facilitate the transport in the pipe of our country. Experimental study was conducted to analyze the influence of a viscosity reducer of biological origin (BRV), on the rheological behavior of heavy oil in the northern region of Mexico, finding that it exhibits a non-Newtonian viscoelastic behavior, where a concentration increase of BRV leads to a consistency decrease and an increased flow order, where dilatant behavior was observed in high temperatures. From these results it was estimated the pressure losses by friction in a horizontal pipe for single phase and two phase flow. We found that in all cases the increase in the concentration of BRV reduces these losses.

Key words: rheology, heavy crude oil, viscosity reducer