

Reducción en la caída de presión con respecto a la viscosidad en un oleoducto: BRV

Edgardo Jonathan Suárez Domínguez
Mexican Institute of Complex Systems, A.C.
jsd@mics.edu.mx

Jesús Fortunato Flores López
Geo Estratos, S.A. de C.V.

Elena Izquierdo Kulich
Departamento de Química-Física,
Facultad de Química, Universidad de la Habana
elenaik@fq.uh.cu

Arturo Palacio Pérez
Instituto de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México
apalaciop@ii.unam.mx

Información del artículo: Recibido: marzo de 2015-aceptado: mayo de 2015

Resumen

Los crudos pesados son una problemática actual en la región norte del país por la presión requerida, (debido al alto coeficiente de fricción), en los oleoductos donde se transportan hasta los puntos de venta o centros de refinación, por lo que son requeridos diversos métodos para disminuir la viscosidad, siendo las baterías de calentamiento el proceso al que más se recurre; el método por calentamiento generalmente incrementa los costos en infraestructura e insumos para la generación de calor, disminuye la seguridad del personal e implica la posibilidad de cambio de fases en el crudo. El uso de productos químicos es posible para obtener este mismo efecto. En el presente trabajo se exponen los resultados obtenidos en la prueba desarrollada en un ducto en donde se dosificó un biorreductor de viscosidad. Se encontró un incremento aproximado del 30% en el transporte de fluido y una disminución en la caída de presión a lo largo de la tubería. Por otro lado, el costo de aplicación del producto evaluado, BRV, fue 21% más económico con respecto a otras alternativas de mejoramiento de producción como calentamiento y la inyección de productos químicos sin requerir más infraestructura ni procesos subsecuentes de separación.

Palabras clave: Biorreductor de viscosidad, crudo extrapesado, mejoramiento de flujo.

Reduction in the pressure drop over the pipeline viscosity: BRV

Abstract

Heavy crudes are an actual problem in the northern region of the country for the pressure (due to the high coefficient of friction) required in pipelines which are transported to retail outlets or refining centers; there are required methods to decrease viscosity usually as heating batteries; method by heating generally increases infrastructure costs and decrease

personnel safety and involves the possibility of changes in oil phases. The use of chemicals is possible to obtain the same effect. In this paper the results of the test developed in a pipeline in which was dosed with a viscosity bioreducer is exposed. An approximate 30% increase in fluid transport and a decrease in pressure drop along the pipeline was found. Furthermore, the cost of implementing the evaluated product, was 21% cheaper compared to other alternatives to improve production as heating and chemical injection without requiring more infrastructure and subsequent separation processes.

Keywords: Viscosity bioreducer, extraheavy crude oil, flow improvement.

Introducción

Actualmente la industria petrolera presenta áreas de oportunidad en el conocimiento del transporte de crudo pesado, lo cual se debe a su alta viscosidad y los problemas operacionales que esto puede conllevar, como altos costos de bombeo, la deposición de fracciones pesadas y otros cambios de fase, (Santos, R. et.al. 2014, Huang Z. 2011; Tian, Z. 2014).

El estudio de los patrones de flujo y los perfiles de velocidad es muy importante debido a que estos efectos se encuentran directamente relacionados con la potencia de bombeo y los costos de transporte, (Martínez-Palou, R. 2011), así como el diseño de monitoreo en ductos, (Thorn, R. et.al. 2013); aunque frecuentemente se emplean emulsiones para mejorar el transporte de ducto, (Laurencio-Alfonso H. & Delgado-Drubey Y. 2008) y se inyectan reductores de viscosidad, (Suárez-Domínguez, E.J. et. al. 2013). Son pocos los estudios que han profundizado en los efectos relacionados con la forma del fluido inyectado y dosificación de los productos en el crudo. La mayor parte de las veces las investigaciones se enfocan al dimensionamiento de bombas, (Delgado N. et.al. 2007; Muñoz Prior, M.A. 2011), limitando las capacidades al utilizar la misma infraestructura para fluidos más pesados.

Los crudos pesados y extra-pesados se caracterizan por presentar una elevada viscosidad que se manifiesta en una alta caída de presión asociada a su extracción y transporte, con el consiguiente incremento en el costo de producción. Esta elevada viscosidad se debe fundamentalmente a la presencia de los asfaltenos, la fracción más pesada del petróleo crudo, que tienden a presentarse como una fase dispersa estabilizada en presencia de las parafinas, (Suárez-Domínguez, E.J. et. al. 2013). Esta solución coloidal

se desestabiliza usualmente debido a las perturbaciones causadas por el movimiento del crudo, lo que se manifiesta en un incremento apreciable de la viscosidad y en la formación de incrustaciones en los tubos producto de la precipitación de los conglomerados relativamente grandes de asfaltenos.

La viscosidad en los líquidos tiende a disminuir con la temperatura, de aquí que el calentamiento del crudo constituye una de las vías para disminuir este parámetro, no obstante, la disminución del costo por concepto de bombeo no es indicativo en este caso de una disminución apreciable en el costo total debido al consumo energético que representa el empleo de una fuente de calentamiento.

Otra solución que se puede utilizar es el empleo de agentes químicos que incrementen la dispersión de asfaltenos en el crudo, lo que lleva a igual efecto de disminución de viscosidad, con la ventaja adicional de disminuir las incrustaciones que se forman. En este trabajo se presentan los resultados obtenidos en relación con el efecto del agente dispersante BRV sobre la viscosidad de un crudo pesado a diferentes temperaturas y se predice la reducción de la caída de presión que se puede lograr utilizando este producto. Este biorreductor de viscosidad, o agente dispersante BRV es un producto químico constituido por compuestos derivados de aceites vegetales modificados y que se incorporan irreversiblemente al crudo, sumándose a la fracción media del mismo.

Parte experimental

Para estudiar la influencia del agente dispersante BRV se empleó un crudo cuyas características generales se muestran en la **Tabla 1**.

Tabla 1. Características del crudo.

	Valor
Densidad kg.m ³	998
% asfaltenos	25.8
% parafinas	10.9

Las mediciones de viscosidad fueron realizadas con un viscosímetro Brookfield a tres temperaturas diferentes, 25, 60 y 80 grados Celcius y diferentes concentraciones de BRV (0, 0.5, 1, 3). Las mediciones de torque con respecto a la

viscosidad indicaron un comportamiento no newtoniano, por lo que se empleó el modelo potencial para describir el comportamiento de la viscosidad aparente η :

$$\eta = m\gamma^n$$

Donde m es la consistencia, n es el orden del flujo y γ es el gradiente de velocidad. Los valores de orden y consistencia fueron determinados a partir de los datos experimentales utilizando técnicas de regresión no lineal y el programa Satgraphics.

y un crudo pesado dosificando una concentración específica de la formulación química.

Una vez definido el tipo del crudo, se utilizó un modelo matemático para determinar el efecto del BRV en la caída de presión de un ducto.

Resultados y discusión

Los resultados obtenidos se muestran en la **Tabla 2**. Estos resultados indican que la consistencia disminuye exponencialmente con la concentración de BRV y con el incremento de temperatura, lo cual se muestra en las **Figuras 1 a 3**.

Finalmente se realizaron dos pruebas tecnológicas utilizando dos ductos existentes con un crudo extra pesado

Tabla 2. Valores de consistencia y orden a diferentes temperaturas y concentración de BRV.

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	0.949	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	0.986	0.977	0.989	0.983	0.986
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 (correlación)	0.963	0.936	0.956	0.949	0.955

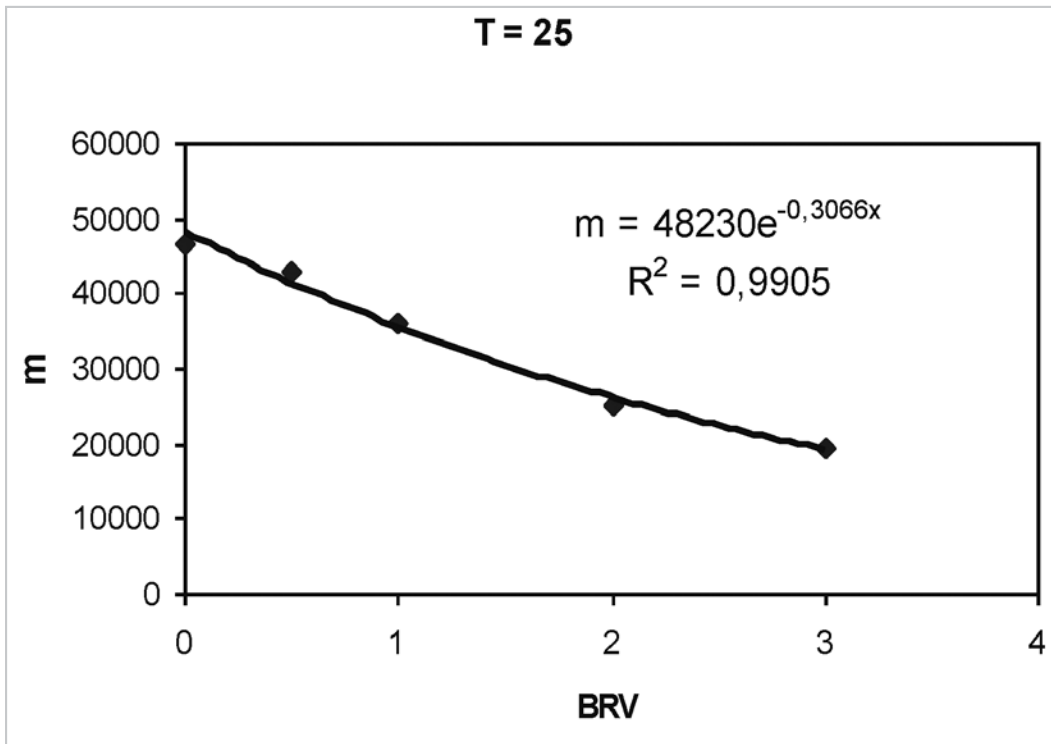


Figura 1. Comportamiento de la consistencia con respecto a la concentración de BRV para una temperatura de 25 grados.

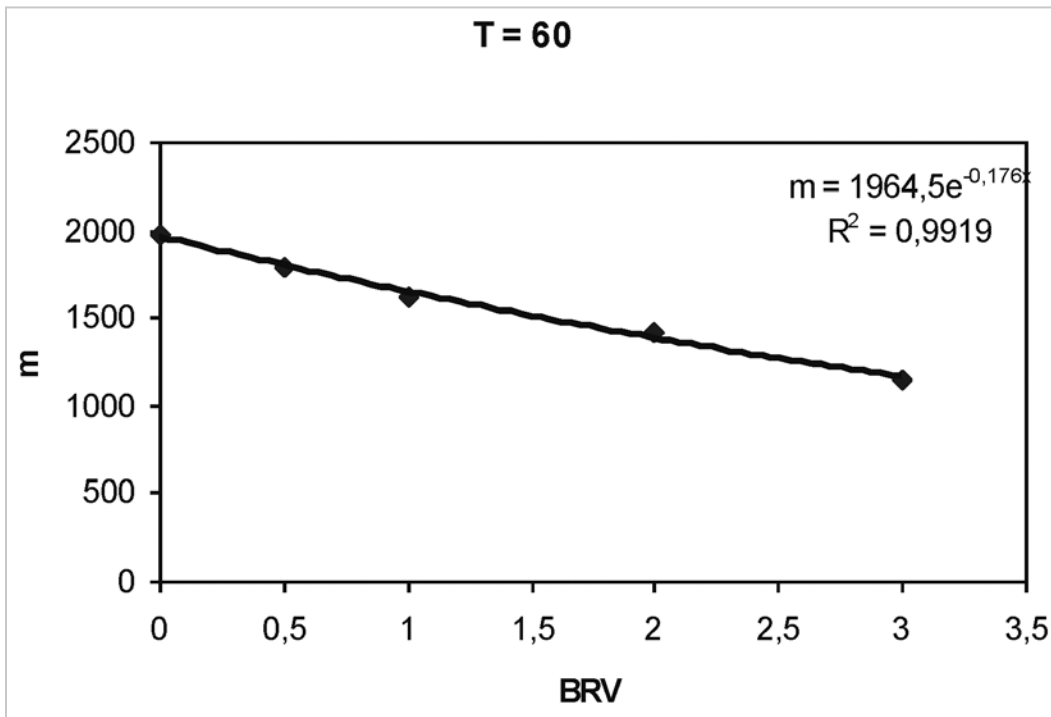


Figura 2. Comportamiento de la consistencia con respecto a la concentración de BRV para una temperatura de 60 grados.

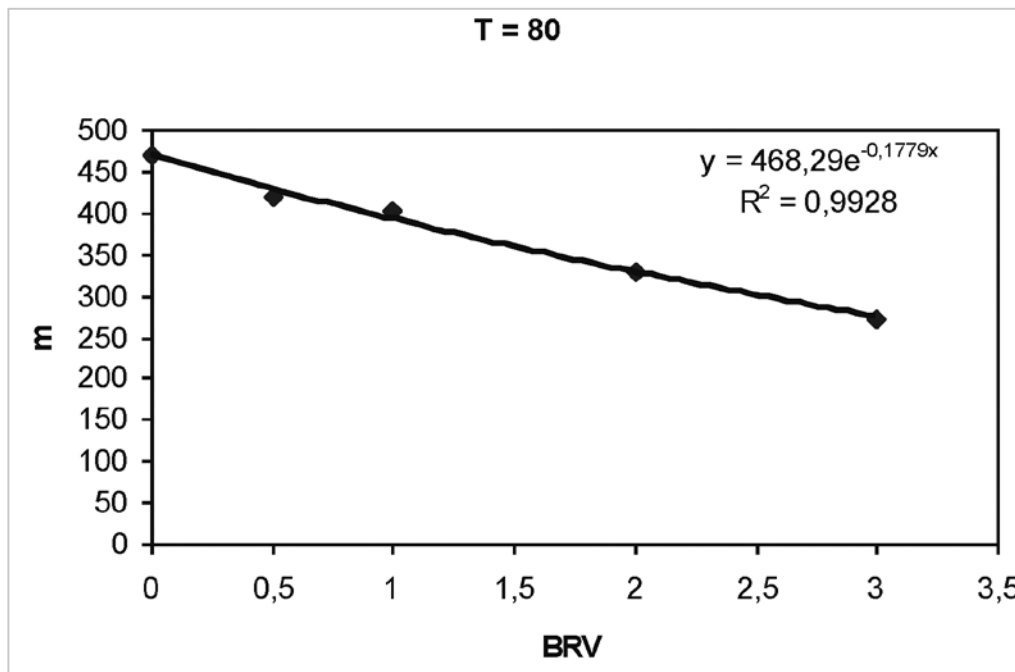


Figura 3. Comportamiento de la consistencia con respecto a la concentración de BRV para una temperatura de 80 grados.

En cuanto al orden del flujo, se aprecia que se incrementa con la temperatura, es prácticamente independiente de la concentración de BRV para las temperaturas de 25 y

60 grados, pero se incrementa de forma cuadrática con respecto a la concentración para la temperatura de 80 grados, **Figura 4.**

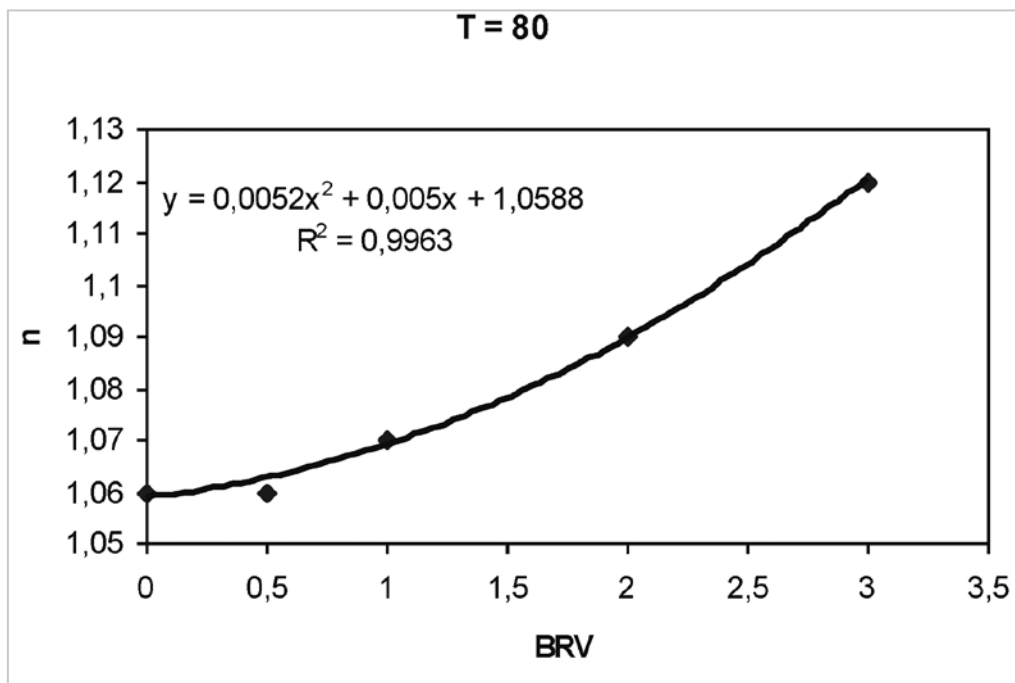


Figura 4. Comportamiento del orden del flujo con respecto a la concentración de BRV para una temperatura de 25 grados.

La disminución de la consistencia influye favorablemente en el sentido de la disminución de la viscosidad, mientras que el incremento del orden de flujo, que toma incluso valores por encima de una a bajas temperaturas, es desfavorable, por lo que es necesario simular el comportamiento de la

caída de presión para analizar el efecto global que ambos factores conllevan en las pérdidas por fricción.

Por otra parte, se realizó la estimación de la caída de presión por fricción que se detalla a continuación.

Estimaciones de caída de presión en un ducto

Sabiendo que para un fluido no newtoniano en régimen laminar cuya viscosidad aparente se describe a través del modelo potencial, el número de Reynolds se determina como:

$$R_e = \frac{8\left(\frac{D}{2}\right)^n V^{2-n} \rho}{m} \left(\frac{n}{3n+1}\right)^n$$

y el factor de fricción:

$$f = \frac{16}{R}$$

La caída de presión por unidad de longitud del tubo está dada por:

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

Sustituyendo apropiadamente se obtiene:

$$\frac{\Delta P_l}{L} = \frac{4}{\left(\frac{1}{2}\right)^n} V^n \frac{m}{D^{n+1} \left(\frac{n}{3n+1}\right)^n}$$

Para realizar la simulación se consideró inicialmente un tubo de diámetro igual a 0.254 m. Los comportamientos predichos se presentan en las **Figuras 5, 6 y 7**, donde se muestra el comportamiento de la pérdida de presión por fricción con respecto a la velocidad del flujo tomando como parámetro la concentración de BRV y los tres valores de temperatura considerados.

En este caso se aprecia una disminución significativa de las pérdidas de presión por fricción con el incremento de la concentración de BRV, lo que indica que la disminución de la consistencia es el factor que determina este efecto, siendo despreciable la influencia del incremento en el orden de flujo observado a la temperatura de 80 grados.

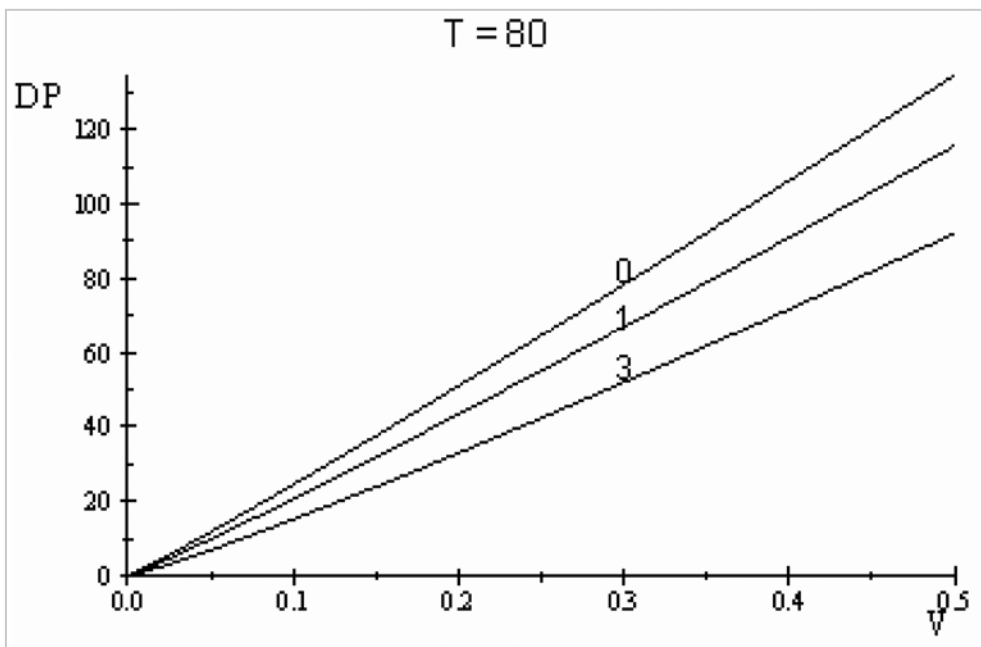


Figura 5. Comportamiento de la caída de presión con respecto a la velocidad del fluido para diferentes valores de concentración de BRV y temperatura de 80 grados.

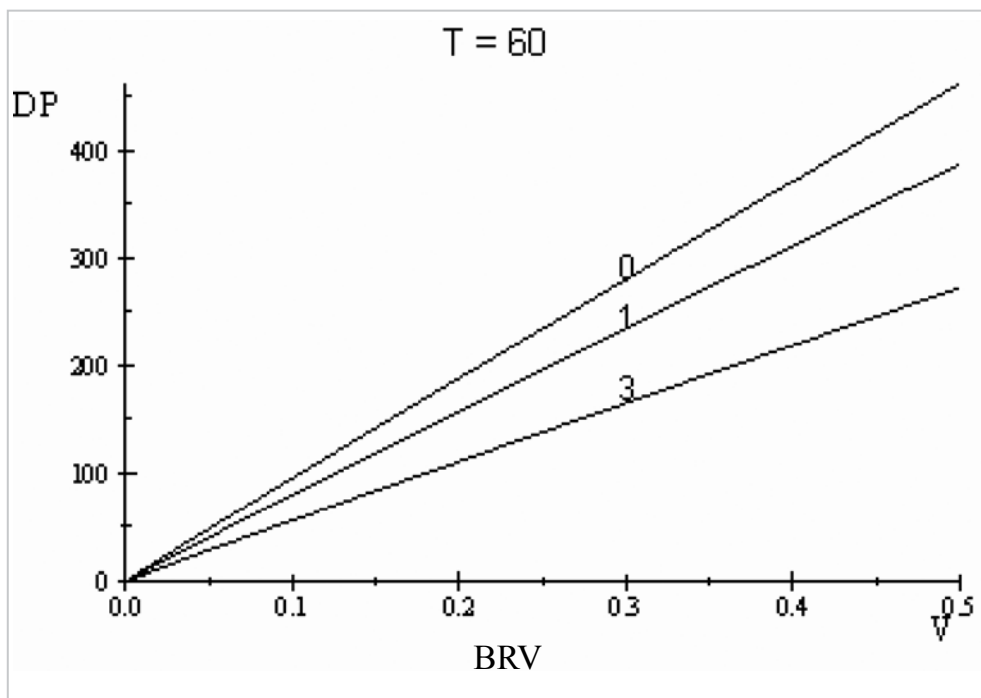


Figura 6. Comportamiento de la caída de presión con respecto a la velocidad del fluido para diferentes valores de concentración de BRV y temperatura de 60 grados.

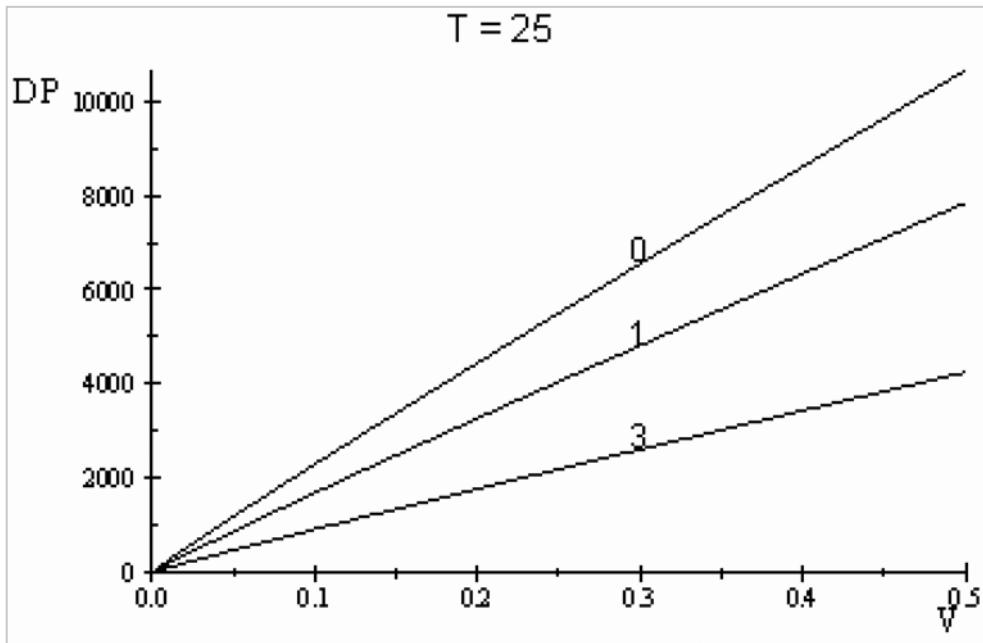


Figura 7. Comportamiento de la caída de presión con respecto a la velocidad del fluido para diferentes valores de concentración de BRV y temperatura de 60 grados.

Prueba de campo

Para probar el biorreductor de viscosidad se realizaron dos pruebas de campo, en la primera se transportó un crudo extrapesado de más de 40000cP a 25°C de viscosidad y en un ducto de 12 pulgadas y 48km de longitud, dividido en cuatro estaciones de re-bombeo y/o calentamiento. El proceso de inyección se realizó al principio de la tubería y todas las características de los equipos utilizados permanecieron sin modificarse.

Por otro lado, para un crudo pesado se utilizó un ducto cuyo diámetro fue de 10 pulgadas con una longitud total de 29 km en el cual se transportan, en aproximadamente 11,500 bpd de crudo de 16 °API, con una viscosidad de 2,223 cP a 25 °C. La presión de operación del ducto a la salida en promedio, es de 61.5 Kg/cm² a una temperatura de 39 °C.

Por otro lado, se calcularon las caídas de presión conservando los flujos iniciales, encontrando que se tiene una reducción en la caída de presión de hasta 4kg/cm² para la primera prueba de campo, **Figura 8**.



Figura 8. Medición de presión para ducto de 48 km de longitud.

Durante la dosificación del producto BRV, (periodos 3,4 y 5 de la **Figura 9**), la presión inicia con 59.98 kg/cm² y termina con 58.65 kg/cm² y el flujo bombeado fue de 11,686 a 12,546

BPD, es decir, la presión disminuye 1.33 kg cm² y el flujo aumenta 860 BPD, con un volumen dosificado de producto BRV de 0.5 a 0.6%.

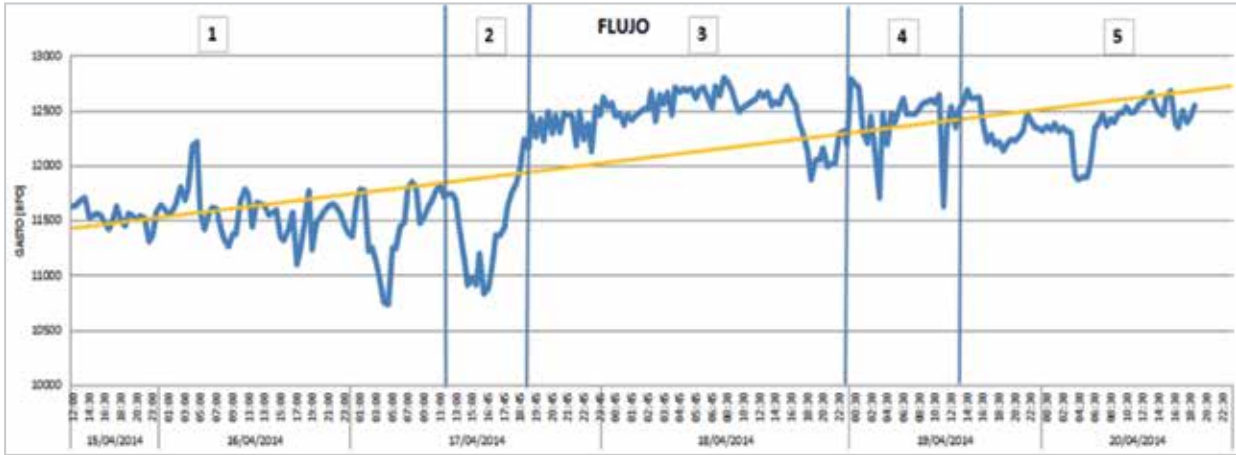


Figura 9. Evaluación del biorreductor de viscosidad, BRV en un ducto de 28 km.

Análisis de costos

Para el análisis económico se desarrolló un escenario probabilístico con un modelo de tipo Montecarlo, que consideró tres variables: el incremento esperado en la producción, el precio en dólares del barril de petróleo en base al índice WTI y el precio del servicio del servicio por barril transportado en el ducto, expresado en dólares.

Para las variables “incremento de producción” y “precio del barril de crudo USD (WTI)”, se toman en cuenta tres diferentes escenarios considerando un escenario pesimista, un optimista y uno más probable. También se tomaron en cuenta resultados de la simulación de operación de un oleoducto de exportación de la región México norte y que se contempló anteriormente para crudo extrapesado. Los resultados pueden observarse en la **Figura 10**.

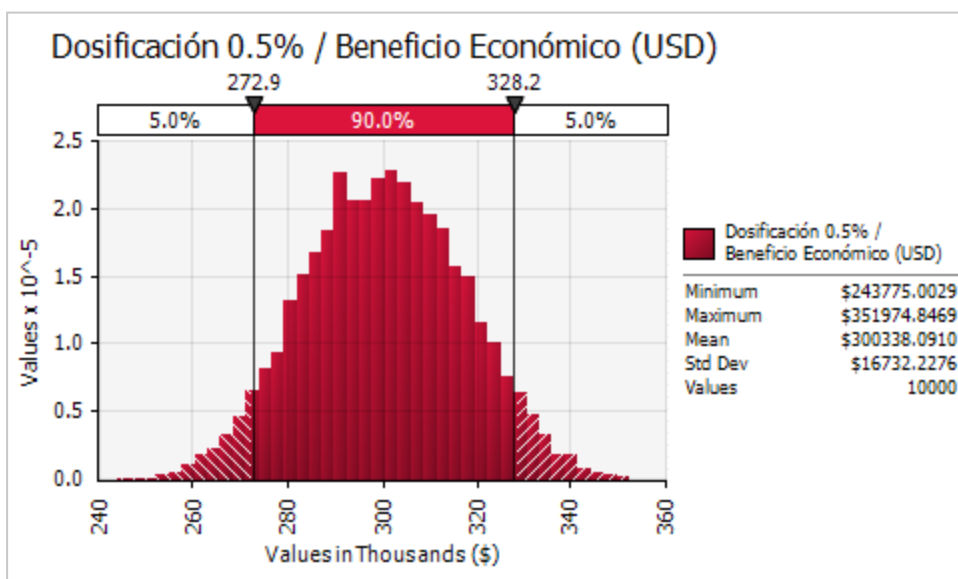


Figura 10. Beneficio económico para una producción dada al dosificar BRV.

Dentro de las variables consideradas en este modelo económico se encuentran un flujo de operación del ducto de 11,300 bpd, un aumento en la capacidad de transporte del oleoducto de 3,900 bpd, un precio del barril de petróleo de \$90 USD y el precio por servicio de

dosificación máximo de BRV® de \$2.30 USD por barril transportado.

La **Figura 11** muestra la diferencia en costo de producción de una producción con y sin dosificación de BRV.

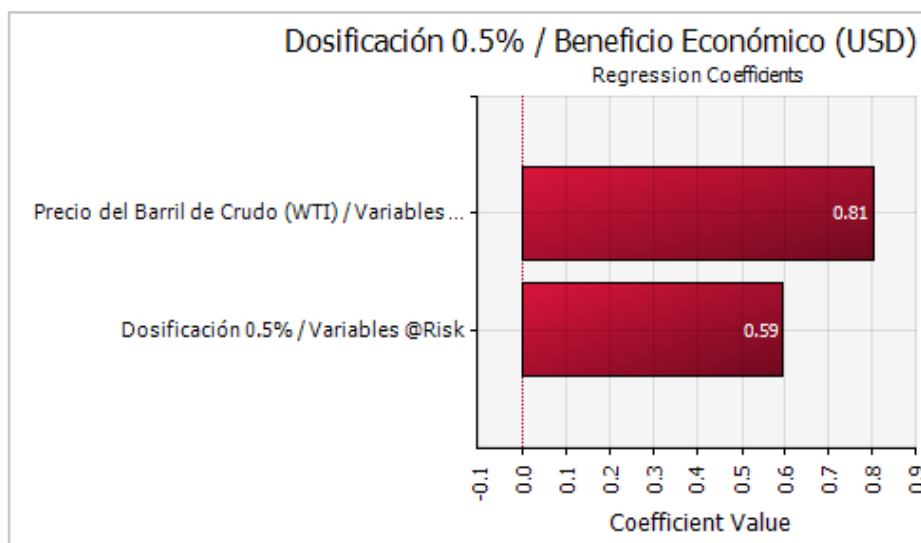


Figura 11. Beneficio económico para una producción dada al dosificar BRV, (parte 2).

Conclusiones

El análisis reológico del crudo analizado permitió constatar que éste presenta un comportamiento no newtoniano que puede describirse adecuadamente mediante el modelo potencial de viscosidad aparente. Este comportamiento reológico se mantiene en presencia de BRV, el cual causa una disminución apreciable de la consistencia del fluido, no afectando el valor del orden del flujo excepto a la temperatura de 80 grados, donde se aprecia que el orden se incrementa con la concentración de BRV. Por otra parte, el orden también se incrementa con la temperatura para iguales valores de concentración de BRV.

La modelación del comportamiento de las pérdidas de presión por fricción con respecto a la velocidad del fluido para diferentes valores de la concentración de BRV indica que éstas disminuyen de forma significativa con el incremento de esta concentración.

Se corroboró el efecto de BRV en un ducto encontrando que las correlaciones teóricas se correspondieron con los resultados experimentales de campo. Por lo tanto,

se considera que este agente de dispersión puede ser utilizado con éxito para disminuir los costos de extracción de crudos pesados.

Nomenclatura

m = Consistencia de flujo

n = Orden de flujo

γ = Gradiente de velocidad

ΔP_1 = Caída de presión

D = Diámetro del tubo

V = Velocidad media

ρ = Densidad del fluido

L = Longitud del tubo

p_1 =	Presión inicial
p_2 =	Presión final
g =	Gravedad
h =	Altura
f =	Factor de fricción

Agradecimientos

Se agradece el apoyo del M.A. Luis de la Garza por su apoyo en la elaboración de las gráficas e interpretación del estudio económico.

Referencias

- Awad, M.M. y Muzychka, Y.S. 2005. Bounds on Two-Phase Flow: Part I-Frictional Pressure Gradient in Circular Pipes. *Proc. ASME 2005 International Mechanical Engineering Congress and Exposition*, Orlando, Florida, noviembre 5-11. <http://dx.doi.org/10.1115/IMECE2005-81493>.
- Brill, J.P. y Beggs, D. 1991. *Two-Phase Flow in Pipes*, sixth edition.
- Delgado, N. Ysambertt, F., Montiel, C. et al. 2007. Evaluation of Oil-in-Water Emulsions with Non-Ionic and Anionic Surfactants Mixtures for Potential Use in the Oil Industry. *Rev. Téc. Ing. Univ. Zulia* **30** (2): 118 – 127.
- Dukler A.E., Wicks III, M. y Cleveland, R.G. 1964. Frictional Pressure Drop in Two-Phase Flow: B. An Approach Through Similarity Analysis. *AIChE J.* **10** (1): 44-51. <http://dx.doi.org/10.1002/aic.690100118>.
- Dukler A.E. 1969. *Gas-Liquid Flow in Pipelines, Vol. 1: Research Results*. New York: American Gas Association.
- Huang, Z., Lee, H.S., Senra, M. et al. 2011. A Fundamental Model of Wax Deposition in Subsea Oil Pipelines. *AIChE J.* **57** (11): 2955-2964. <http://dx.doi.org/10.1002/aic.12517>.
- Laurencio Alfonso, H. y Delgado Drubey, Y. 2008. Influencia de la Temperatura en las Propiedades Reológicas de la Emulsión de Petróleo Pesado. *Minería y Geología* **24** (2):1-12.
- Martínez-Palou, R., Mosqueira, M.L., Zapata-Rendón, B. et al. 2011. Transportation of Heavy and Extra-Heavy Crude Oil by Pipeline: A Review. *Journal of Petroleum Science and Engineering* **75** (3-4): 274-282. <http://dx.doi.org/10.1016/j.petrol.2010.11.020>.
- Muñoz Prior, M.A. 2010. Innovación Tecnológica en Sistemas de Bombeo para Fluidos de Alta Viscosidad. Tesis de maestría, Instituto Politécnico Nacional, México, D.F.
- Santos, R.G., Loh, W., Bannwart, A.C. et al. 2014. An Overview of Heavy Oil Properties and its Recovery and Transportation Methods. *Braz. J. Chem. Eng.* **31** (3): 571-590. <http://dx.doi.org/10.1590/0104-6632.20140313s00001853>.
- Suárez-Domínguez, E.J., Gómez-Espinoza, J. y González-Dávila, V. 2013. Correlaciones para el Mezclado de Crudos con un Reductor de Viscosidad, BRV. *Bol. Soc. Quím. Mex. QPET.* **7** (1 número especial): 3-6.
- Suárez-Domínguez, E.J., Palacio-Pérez, A., Rodríguez Contreras, A. et al. 2014. Influencia del Biorreductor de Viscosidad en el Gradiente de Presión en un Ducto Horizontal que Transporta Fluido No Newtoniano. *Revista Cubana de Ingeniería* **5** (1) 45-50.
- Thorn, R., Johansen, G.A. y Hjertaker, B.T. 2013. Three-Phase Flow Measurement in the Petroleum Industry. *Meas. Sci. Technol.* **24** (1): 1-17. <http://dx.doi.org/10.1088/0957-0233/24/1/012003>.
- Tian, Z., Jin, W., Wang, L. et al. 2014. The Study of Temperature Profile Inside Wax Deposition Layer of Waxy Crude Oil in Pipeline. *Frontiers in Heat and Mass Transfer* **5** (5): 1-8. <http://dx.doi.org/10.5098/hmt.5.5>.

Semblanza de los autores

Edgardo Jonathan Suárez Domínguez

Químico Industrial y Arquitecto, Maestro en Ingeniería, Doctorante en Ingeniería Mecánica por la Universidad Nacional Autónoma de México. Profesor y director de investigación del Mexican Institute of Complex Systems en Tampico, Tamaulipas, México. Área temática principal: desarrollo de productos químicos para la industria petrolera y análisis de flujo.

Jesús Fortunato Flores López

Ingeniero Químico, Maestro en Ingeniería Industrial, por el ITCM y la Universidad Autónoma de Tamaulipas, respectivamente. Ingeniero de proyectos y coordinación del área de estimulación de la empresa mexicana Geo Estratos SA de CV.

Elena Izquierdo Kulich

Ingeniera Química, Doctora en Ciencias Técnicas, Investigadora, Profesora Titular, Departamento de Química-Física, Facultad de Química, Universidad de La Habana, La Habana, Cuba.

Arturo Palacio Pérez

Ingeniero Mecánico, Doctor en Ingeniería Mecánica Teórica, Investigador, Profesor, Instituto de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México.