

Modelo para simulación de la potencia de flujo en tuberías conductoras de petróleo pesado con comportamientoseudoplástico

Model for simulation flow power in heavy oil conductive pipes with pseudoplastic behavior

Héctor Luis Laurencio Alfonso¹ Yoalbys Retirado Mediaceja²
José Francisco Falcón Hernández³ Enrique Torres Tamayo¹ Marcelo Fabián Salazar Corrales⁴

Recibido 01 de abril de 2020, aceptado 22 de febrero de 2022

Received: April 01, 2020 Accepted: February 22, 2022

RESUMEN

En los sistemas de transporte de petróleos pesados por tuberías conductoras, se encontró la necesidad de modelar la potencia de flujo, considerando los efectos de mezcla en régimen laminar y el carácter no estacionario del fluido. En la presente investigación se tomaron en consideración cuatro componentes para modelar la potencia de flujo, la potencia de flujo debido al esfuerzo viscoso del fluido, la potencia de flujo adicional por efectos de mezclado en la tubería, la potencia de flujo de carácter no estacionario y la potencia de flujo necesaria para vencer a los cambios de energía potencial. Para la identificación de los coeficientes del modelo empírico teórico, se experimentó con variaciones de temperaturas de 40 a 65 °C, para los diámetros 0,2 y 0,3 m; donde se simuló tomando el índice de flujo con el valor promedio de 0,925, considerándose un fluido pseudoplástico. El modelo empírico teórico obtenido simula la potencia de flujo con un error promedio de 4,5%; el que se recomienda para la implementación en el diseño y evaluación energética de sistemas de bombeo de petróleos crudos con comportamientoseudoplástico y carácter no estacionario.

Palabras clave: Potencia de flujo, petróleo pesado, flujo no estacionario, comportamiento reológico.

ABSTRACT

In the transport systems of heavy oils through conductive pipes, the need was found to model the flow power, considering the effects of mixing in laminar regime and the non-stationary nature of the fluid. In the present investigation four components were taken into account to model the flow power, the flow power due to the viscous stress of the fluid, the additional flow power due to mixing effects in the pipe, the non-stationary flow power and the flow power necessary to overcome potential energy changes. For the identification of the coefficients of the theoretical empirical model, it was experimented with temperature variations from 40 to 65 °C, for diameters 0,2 and 0,3 m; where it was simulated taking the flow rate with the average value of 0,925, being considered a pseudoplastic fluid. The theoretical empirical model obtained simulates the flow power with an average error of 4,5%; which is recommended for the implementation in the design and energetic evaluation of crude oil pumping systems with pseudoplastic behavior and non-stationary character.

Keywords: Flow power, heavy oil, non-stationary flow, rheological behavior.

¹ Facultad de Ciencias de la Ingeniería y Aplicadas. Universidad Técnica de Cotopaxi. Latacunga, Cotopaxi, Ecuador. Email: hector.laurencio@utc.edu.ec, enrique.torres@utc.edu.ec

² Facultad de Metalurgia y Electromecánica. Universidad de Moa. Municipio de Moa. Holguín, Cuba. Email: yretirado@ismm.edu.cu

³ Facultad de Ingeniería Química. Universidad de Oriente. Santiago de Cuba, Cuba. Email: falcon@fiq.uo.edu.cu

⁴ Departamento de energía y mecánica. Universidad de las Fuerzas Armadas. Latacunga, Cotopaxi Ecuador. Email: mfsalazar@espe.edu.ec

* Autor de correspondencia: hector.laurencio@utc.edu.ec

INTRODUCCIÓN

En el transporte de fluidos de elevada viscosidad por sistemas de tuberías, se originan pérdidas energéticas considerables, las cuales deben ser tomadas en cuenta para el proceso de selección o evaluación de los sistemas de bombeo. En este caso se define a la potencia de flujo como el parámetro que integra las variables del proceso de transporte en los sistemas de bombeo. El principal problema en el transporte del petróleo crudo pesado consiste en que son fluidos con comportamiento no newtoniano [1].

A partir del estudio reológico realizado por [2], se demostró que el petróleo crudo objeto de estudio, mantiene un comportamiento pseudoplástico para variación de temperatura de 29 a 69,8 °C. Para este caso se observa que la temperatura no provocó cambios significativos en el índice de flujo, manteniendo un valor promedio de 0,925, aunque sí en el índice de consistencia másica y la viscosidad aparente, los que disminuyeron al aumentar la temperatura.

En la modelación y simulación de pérdidas de carga en tuberías se cuenta con modelos basados en estudios y correlación de datos experimentales, mostrándose en los sistemas industriales desviaciones entre los resultados de las simulaciones computacionales y los valores experimentales [3].

Uno de los factores detectados en investigaciones desarrolladas en este campo [4], es la conducta electrocinética de ciertos crudos vinculándolos con la fluidodinámica, donde se plantea que cuando el petróleo crudo ingresa a la tubería se genera una diferencia de carga entre asfaltenos y los demás componentes del petróleo, creándose un campo de potencial entre la pared y el fluido, y entre la entrada y la salida de la tubería. La diferencia de potencial se opone al flujo multifásico por las tuberías y como resultado las partículas tienden a contrafluir; en este caso se incrementan las pérdidas de presión en las tuberías conductoras.

Resultados reportados por [5], muestran diferencias significativas en la predicción del gradiente de presión entre modelos homogéneos, donde se presenta la forma de evaluar la viscosidad del petróleo, se plantea la importancia de incorporar las variaciones de densidad de mezcla en los procesos

de modelación. En los sistemas multifásicos existe un marcado efecto de la densidad de mezcla en el gradiente de presión, debido a los cambios de energía cinética [6].

Considerando un fluido pseudohomogéneo, para el flujo de petróleo en tuberías horizontales [7], evalúan el efecto de la densidad y la viscosidad dinámica de mezclas de petróleo en la determinación del gradiente de presión longitudinal.

Para diferentes diámetros de tubería en [8], se ha realizado la modelación de la pérdida de presión que se genera en las tuberías al bombear un petróleo crudo; estos modelos son aplicables para diferentes regímenes de flujo (transición, laminar y turbulento), en este caso no se considera el carácter no estacionarios del fluido.

Analizando el flujo de polímeros en tuberías [9], determinó la relación del factor de fricción mediante la experimentación del gradiente de presión, para mezclas newtonianas y no newtonianas del tipo pseudoplásticas, donde se proponen correlaciones del factor de fricción expresadas en función del número de Reynolds.

En varias investigaciones se han reportado ciertas desviaciones de los modelo tradicional en el caso del régimen laminar [1], atribuidas al efecto de esfuerzos de cortes perpendiculares a la velocidad del fluido en la tubería; efectos manifestados en los líquidos de elevada viscosidad que se transporta por tuberías de diámetros superiores a una pulgada [10].

De las consultas bibliográficas realizadas, relacionadas al transporte de petróleos pesados y a fluidos no newtonianos en general, no se ha encontrado referencias de modelos matemáticos que describan el comportamiento de la potencia de flujo para fluidos con comportamiento pseudoplástico.

En la generalidad de las investigaciones analizadas se trata la fenomenología en fluidos no newtonianos, las cuales no describen el comportamiento de la potencia de flujo con comportamiento no estacionario, y las irregularidades del flujo en régimen laminar.

El objetivo del presente artículo se centra en: Modelar la potencia de flujo en tuberías durante el transporte de petróleos pesados, considerando los

efectos de mezcla en régimen laminar y el carácter no estacionario del fluido.

ANÁLISIS TEÓRICO

Procedimientos para la determinación de la potencia de flujo en tuberías

Para el diseño de sistemas de tuberías se requiere conocer la relación entre los gradientes de presión (dp/dx) requeridos para lograr flujos volumétricos (Q) en un intervalo de diferentes diámetros (D) de la tubería, a distinta temperatura de operación y diferentes propiedades físicas de los fluidos [11].

Considerando las fuerzas que intervienen en el proceso de flujo, se parte de una sección de tubería inclinada, con movimiento del fluido hacia arriba y un ángulo (θ) desde la referencia horizontal (Figura 1).

Para la modelación matemática de la potencia de flujo se parte del modelo del gradiente de presión propuesto por [3], al cual se le adicionó el gradiente de presión causado por el mezclado de capas del fluido en la tubería (F_m) basándose en los planteamientos de tres autores, los que refieren:

- La corriente laminar no se puede considerar carente de torbellinos, porque aún sin presentar torbellinos bien manifestados, con el movimiento de traslación surge un movimiento de rotación ordenado de partículas aisladas del líquido alrededor de su centro instantáneo con velocidades angulares determinadas [12].
- Las ecuaciones tradicionales para el cálculo del gradiente de presión, se cumplen bien para tuberías de diámetros relativamente pequeños;

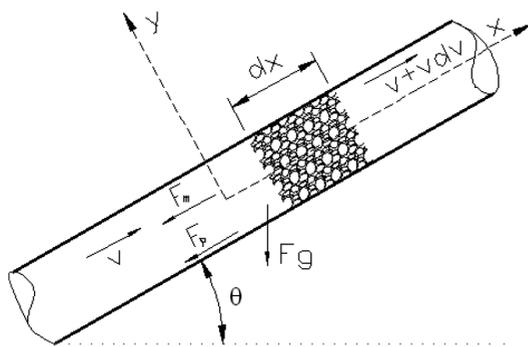


Figura 1. Esquema estructural utilizado en la obtención del modelo.

para tubos de grandes diámetros se detectan ciertas desviaciones entre los valores calculados y los experimentales [13].

- En los problemas de ingeniería, se consideran despreciables los esfuerzos de corte perpendiculares a la dirección del movimiento del fluido, denominado con frecuencia como corriente de arrastre. En los fluidos dominados por la acción viscosa, este efecto no puede ser despreciado [14].

Con la modificación antes relacionada tenemos (ecuación (1)):

$$\rho \cdot \frac{dv}{dt} = \frac{dp}{dx} - \frac{P \cdot \tau_p}{A} - F_m - \rho \cdot g \cdot \text{sen}\theta \quad (1)$$

El esfuerzo de mezclado (F_m) es causado por efecto de mezclado entre capas de fluido, al no considerarse este efecto, se simula la caída de presión con errores superiores al 25% [3].

La potencia de flujo en una tubería se define por (ecuación (2)):

$$N_f = Q \cdot \Delta p \quad (2)$$

Combinando la ecuación (1) con la ecuación (2), tenemos que potencia de flujo longitudinal total en la tubería queda conformado por cuatro componentes (ecuación (3)).

$$\frac{dN_f}{dx} = \left(\frac{dN}{dx}\right)_v + \left(\frac{dN}{dx}\right)_m + \left(\frac{dN}{dx}\right)_a + \left(\frac{dN}{dx}\right)_G \quad (3)$$

En la ecuación (3), $[(dp/dx)_v]$ es la potencia de flujo debido al esfuerzo viscoso del fluido en efecto de las dimensiones de la tubería. Para determinar esta componente, se parte del modelo de pérdidas de presión propuesto por [10] para un fluido pseudoplástico, quedando que (ecuación (4)):

$$\left(\frac{dN}{dx}\right)_v = 2 \cdot K \cdot \left(\frac{3 \cdot n + 1}{n} \cdot \frac{2}{D}\right)^n \cdot \left(\frac{2}{D}\right)^{(n+1)} \cdot Q^{(n+1)} \quad (4)$$

Como segundo término tenemos $[(dp/dx)_m]$, que es la potencia de flujo adicional por efectos de mezclado en la tubería; puede estimarse mediante la ecuación de Darcy-Weisbach, (ecuación (5)):

$$\left(\frac{dN}{dx}\right)_m = \lambda^* \cdot \frac{1}{D} \cdot \frac{v^2}{2} \cdot Q \cdot \rho \quad (5)$$

En este caso, λ^* representa los efectos adicionales del gradiente de presión en régimen laminar [10],(ecuación (6)) manifestados en tuberías de gran diámetro, el cual se determina por experimentación, correlacionándolo con el número generalizado de Reynolds, Re^* (ecuación (12)).

$$\lambda^* = \frac{a}{Re^{*b}} \quad (6)$$

La tercera componente del modelo $[(dp/dx)_a]$ es la potencia de flujo de carácter no estacionaria; se relaciona con los cambios de densidad del fluido, estas pueden ser causadas por variaciones de temperaturas, se parte de la pérdida de presión propuesta por [15], para el cambio de propiedades de mezcla de fluidos, de esta ecuación se obtiene (ecuación(7)):

$$\left(\frac{dN}{dx}\right)_a = \left(\frac{\dot{m}}{A}\right)^2 \cdot \frac{d}{dx} \cdot \left(\frac{1}{\rho}\right) \cdot Q \quad (7)$$

Resolviendo la ecuación (7) y expresado en función del flujo volumétrico, se obtiene (ecuación (8)):

$$\left(\frac{dN}{dx}\right)_A = \frac{16 \cdot Q^3}{\pi^2 \cdot L \cdot D^4} \cdot (\rho_f - \rho_i) \quad (8)$$

La cuarta componente $[(dp/dx)_G]$ es la potencia de flujo necesaria para vencer a los cambios de energía potencial como consecuencia de la inclinación de la tubería, donde (ecuación(9)).

$$\left(\frac{dN}{dx}\right)_G = \rho \cdot Q \cdot g \cdot \text{sen}\theta \quad (9)$$

Siendo expresada la inclinación de la tubería por la ecuación 10.

$$\text{sen}\theta = \Delta Z / L \quad (10)$$

Del análisis realizado, sustituyendo la ecuación (6) en ecuación (5) y sumando las componentes de potencia de flujo en la ecuación (3); se obtiene el modelo de la potencia de flujo para el transporte del petróleo pesado por tuberías. El modelo cumple

con el comportamiento de un fluido pseudoplástico no estacionario, lo que queda expresado como (ecuación(11)):

$$N_f = \left[\begin{array}{l} 2 \cdot K \cdot L \cdot \left(\frac{3 \cdot n + 1}{n} \cdot \frac{4}{\pi \cdot D^2}\right)^n \left(\frac{2 \cdot Q}{D}\right)^{n+1} \\ \frac{a}{Re^{*b}} \cdot \frac{8 \cdot L \cdot \rho \cdot Q^3}{\pi^2 \cdot D^5} + \frac{16 \cdot Q^3}{\pi^2 \cdot D^4} \cdot \\ (\rho_f - \rho_i) + \rho \cdot g \cdot \Delta Z \cdot Q \end{array} \right] \quad (11)$$

El modelo obtenido (ecuación (11)) una vez identificado y validado, tienen gran aplicación práctica en la obtención de la variación de la potencia de flujo en tuberías que transportan fluidos con comportamiento pseudoplástico. Al calcular los sistemas de transporte con el referido modelo se minimizan los errores de escalado al extrapolar resultados experimentales de laboratorio.

Técnica experimental

La investigación de los parámetros del modelo y su validación se realizó a escala industrial. La instalación está dotada de equipos y accesorios que permiten la calidad en el registro, control de las variables y su procesamiento posterior, almacenándose en un programa de adquisición de datos.

Se experimentó con variaciones de temperaturas de 40 a 65 °C. Los datos para la validación del modelo del gradiente de temperaturas fueron obtenidos para los diámetros 0,2 y 0,3 m, siendo estos los de mayor representatividad en las instalaciones industriales.

Con la obtención del gráfico $\lambda = f(Re)$, se estableció la correlación entre el factor de fricción con el aumento del número de Reynolds. El número de Reynolds se determinó en dependencia del modelo reológico del fluido estudiado, según la siguiente ecuación (12).

$$Re^* = \frac{8^{1-n} \cdot D^n \cdot v^{2-n} \cdot \rho}{K} \left(\frac{4 \cdot n}{3 \cdot n + 1}\right)^n \quad (12)$$

El número de corridas experimentales se determinó a partir de la aplicación de un diseño multifactorial. Según los niveles determinados de cada variable, se establecen como mínimo ocho niveles del flujo volumétrico, en dos diámetros de tuberías, para dos réplicas de los experimentos.

La confirmación de la validez de los resultados experimentales con el modelo teórico se desarrolla a través del error relativo, o sea, la diferencia entre el módulo del valor experimental “X_{exp}” de la potencia de flujo y el valor teórico “X_{teo}” obtenido por el modelo para las mismas condiciones del experimento. El error relativo puntual (EP) se calcula por la siguiente expresión (ecuación (13)):

$$E_p = \left| \frac{X_{teo_{exp}} \cdot 100}{X_{exp}} \right| \quad (13)$$

Proceso de identificación del modelo

Para realizar el ajuste del modelo de potencia de flujo por tuberías, se toma como referencia los resultados obtenidos en [2], según la Tabla 1.

Como se recomienda en [2], índice de flujo se toma con el valor promedio de 0,925. Para simular los valores del índice de consistencia másica (K) se utiliza la (ecuación (14)) siguiente:

$$K = \frac{59,86}{e^{(0,056 \cdot r)}} \quad (14)$$

Tabla 1. Parámetros reológicos utilizados para la simulación y coeficiente de correlación múltiple.

Factor	Temperatura (°C)				
	29	38,6	50,2	57,4	69,8
K (Pa·s)	13,55	6,890	3,097	2,220	1,460
n (adim.)	0,917	0,926	0,926	0,925	0,929
R ²	0,997	0,999	0,997	0,998	0,997

Fuente: [2].

El procedimiento general para la solución de identificación del modelo del gradiente de presión, queda representado por el diagrama que se describe en la Figura 2.

Los parámetros indeterminados del modelo son las constantes a y b de la ecuación (6), las características propias de este; se determina de forma experimental y garantizan el ajuste del modelo.

Selección de las variables

En relación con el modelo desarrollado y los planteamientos de [1, 3, 11, 15], se determinó que

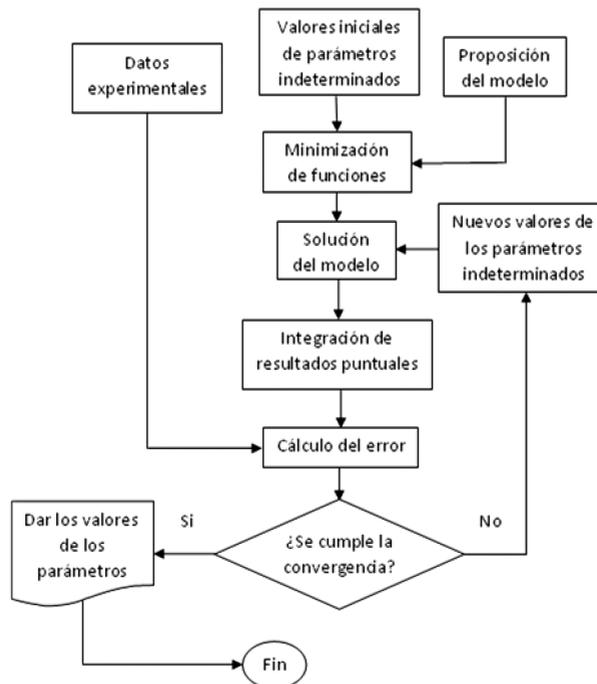


Figura 2. Diagrama para la identificación de los parámetros del modelo.

las pérdidas en las tuberías durante el transporte del petróleo pesado dependen fundamentalmente de los siguientes factores:

- Diámetro de la tubería.
- Flujo volumétrico del combustible en la tubería.
- Temperatura media de transporte del combustible.
- Disposición geométrica de la línea de transporte.

La investigación de los parámetros y regímenes de transportación se realizó en la instalación de la sección del primer impulso del combustible de una central termoeléctrica, a escala industrial. La instalación está dotada de equipos y accesorios que permiten mayor calidad en el registro y control de las variables y su procesamiento posterior, mediante el programa de adquisición de datos Intouch 9,0 (Figura 3).

La investigación de los parámetros de transportación se realizó en el intervalo de temperaturas de 55 a 69 °C, tomadas de forma aleatoria. Los datos para la validación del modelo del gradiente de temperaturas fueron obtenidos para los diámetros 0,2; 0,3 y 0,4 m.

La instalación experimental cuenta con los siguientes instrumentos:

- Flujómetro ultrasónico.
- Manómetros y vacuómetros.
- Termopares.

RESULTADOS

Identificación del modelo propuesto

La comparación de los resultados experimentales con los resultados teóricos obtenidos mediante el empleo de la ecuación (4); se simuló según los parámetros índice de flujo (n) e índice de consistencia másica (K) correspondiente con el modelo reológico [2], los cuales se muestran en la Tabla 2.

En las Figura 4 y Figura 5, se muestran los resultados de la potencia específica de flujo (experimental y teórica) para cada diámetro de tubería analizado.

Como valores promedios de las componentes del modelo (ecuación (4)), se determinó que para tuberías horizontales en el sistema general de experimentación: El 74,7% de las pérdidas de potencia es debido al efecto viscoso, el 16,9% al efecto de mezclado y el 8,4% al cambio de densidad por intercambio térmico, por lo que se hace necesario considerar todos los efectos en los procesos de simulación.

Durante el transporte en la tubería, para el régimen laminar y a partir del análisis del error puntual de cada experimento relacionado a la simulación del modelo, se puede destacar que a medida que aumenta la velocidad del fluido en la tubería, el error tiende a aumentar; este efecto se le atribuye al mezclado

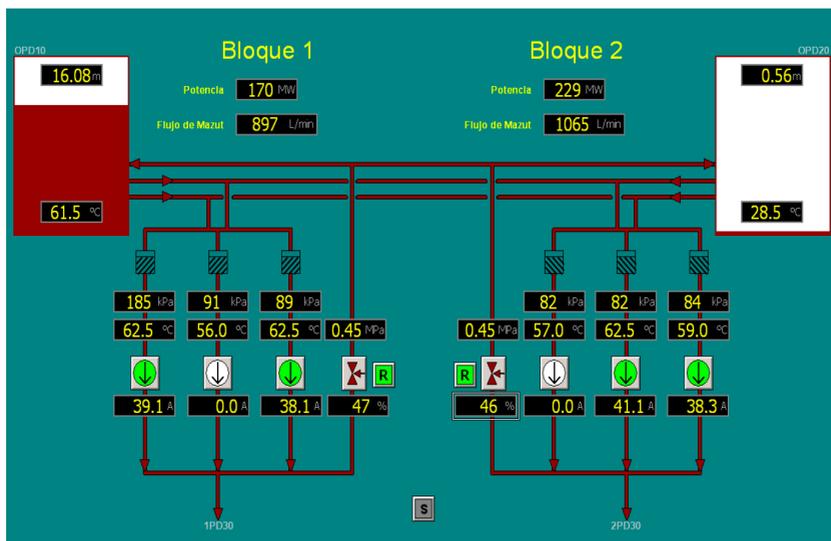


Figura 3. Esquema del sistema de adquisición de datos experimentales, visualizado por el Intouch 9.0.

Tabla 2. Variación de potencia del fluido, teórica y experimental.

D (m)	Q (m ³ /s)	i (Pa/m) Exp. pro.	i (Pa/m) Teó.	N (W/m) Exp.	N (W/m) Teór.	Error
0,2	0,005	162,13	149,02	0,81	0,75	0,08
	0,010	314,03	281,96	3,14	2,82	0,10
	0,015	456,72	409,45	6,85	6,14	0,10
	0,020	612,11	533,51	12,24	10,67	0,13
	0,025	766,57	655,09	19,16	16,38	0,15
	0,030	898,4	774,72	26,95	23,24	0,14
	0,040	1189,06	1009,46	47,56	40,38	0,15
0,3	0,005	34,33	32,44	0,17	0,16	0,06
	0,010	66,89	61,39	0,67	0,61	0,08
	0,015	101,39	89,14	1,52	1,34	0,12
	0,020	131,85	116,16	2,64	2,32	0,12
	0,025	167,5	142,63	4,19	3,57	0,15
	0,030	195,19	168,67	5,86	5,06	0,14
	0,040	258,69	219,78	10,35	8,79	0,15
	0,044	275,07	237,41	11,97	10,33	0,14

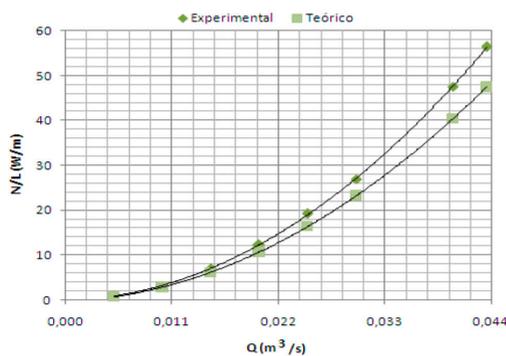


Figura 4. Potencia de flujo en función del flujo volumétrico del petróleo para la tubería de 0,2 m de diámetro.

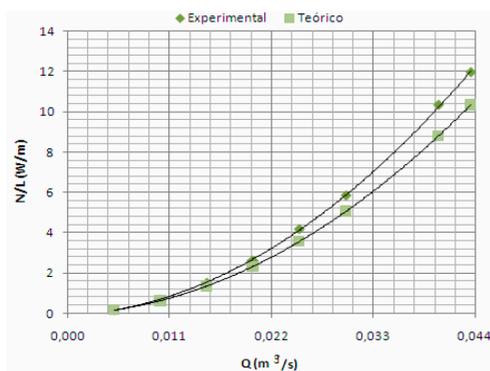


Figura 5. Potencia de flujo en función del flujo volumétrico del petróleo para la tubería de 0,3 m de diámetro.

entre capas que manifiesta el petróleo al fluir por la tubería. Este efecto no ha sido incluido en los modelos reportados por la literatura especializada en el transporte de fluidos.

Obtención de los parámetros del modelo

A partir de los resultados de simulación se obtiene la relación de ajuste del modelo (ecuación (11)), basado en las diferencias encontradas entre los datos experimentales y los valores teóricos calculados. Las diferencias antes mencionadas pueden observarse en la Figura 6.

En la Figura 5 se observa, como tendencia, que el coeficiente de fricción en el caso de flujo con mezcla

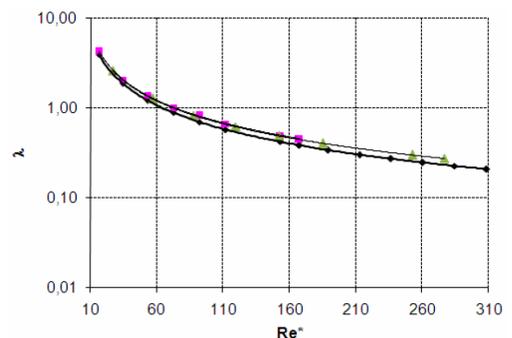


Figura 6. Comparación de la correlación del factor de fricción y el número de Reynolds experimental y el teórico.

es mayor que en el régimen laminar estable, se puede afirmar que este fenómeno sigue la tendencia hasta dar origen al régimen turbulento. Para la identificación del modelo, el factor de fricción adicional (λ^*), ajustado a partir del error del modelo, se correlacionó según se indica en la Figura 7.

La correlación obtenida a partir del análisis de la Figura 4, se expresa como (ecuación (15)):

$$\lambda^* = \frac{0,14}{Re^{*0,2}} \tag{15}$$

Esta expresión satisface el ajuste de la ecuación 11 para el rango de datos experimentados y permite obtener un valor confiable (con un error promedio de 4,5%) en la simulación del proceso de transporte. Los resultados obtenidos son satisfactorios para el cálculo de la variación de potencia de flujo en las instalaciones industriales donde se transporta petróleo crudo pesado por tubería, y constituyen punto de partida para la validación del modelo y las posteriores simulaciones para otros diámetros de tubería, considerándose otros fluidos con comportamiento pseudoplástico y carácter no estacionario.

CONCLUSIONES

Según los resultados experimentales, se evidencian limitaciones en los modelos tradicionales al no tener en cuenta la variación de temperatura durante el transporte, los efectos de rozamiento viscoso, y los efectos de mezclado entre capas de flujo, con el 74,7% de las pérdidas de potencia debido al efecto viscoso, el 16,9% al efecto de mezclado y el 8,4% al cambio de densidad por intercambio térmico.

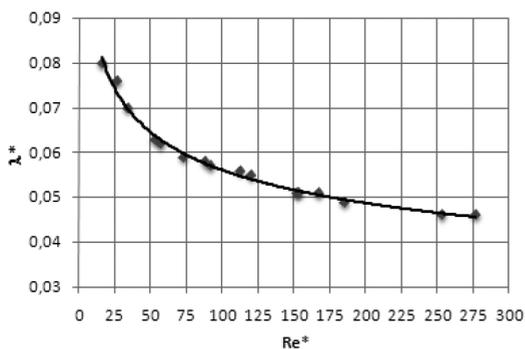


Figura 7. Factor de fricción adicional en función del número de Reynolds.

Con el establecimiento del modelo empírico teórico (ecuación (11)), se posibilita la adecuada simulación de la potencia de flujo en el proceso de transporte de petróleo crudo pesado por tubería.

Se demuestra que en el régimen laminar, para el transporte de fluidos de elevada viscosidad en sistemas de tuberías industriales, no se puede idealizar el proceso de flujo, asumiendo que no existe mezclado entre capas del fluido, este fenómeno es considerado por la ecuación (6).

El modelo empírico teórico obtenido (ecuación (11)) resulta viable para la implementación en el diseño y evaluación energética de sistemas de bombeo de petróleos crudos con comportamiento pseudoplástico y carácter no estacionario.

REFERENCIAS

[1] H. Laurencio, Y. Retirado, J. Falcón y O. Pérez “Modelo para cálculo de pérdidas de presión en tuberías conductoras de petróleo pesado (11° API)”. *Minería & Geología*. Vol. 28 N° 3, pp. 70-86. Julio 2012. ISSN: 19938012.

[2] H. Laurencio, Y. Retirado y A. Gilbert. “Modelado de la viscosidad aparente de un petróleo crudo de 11° API con comportamiento no newtoniano”. *Revista chilena de ingeniería*. Volumen 25 N° 4, pp. 674-680. 2017. ISSN: 0718-3305. DOI: 10.4067/S0718-33052017000400674.

[3] H. Laurencio. “Método para la determinación de parámetros racionales de transporte por tuberías del combustible cubano crudo mejorado 650”. Universidad de Moa. Tesis de doctorado. Moa, Cuba. 2012. URL: <http://ninive.ismm.edu.cu/handle/123456789/1540>

[4] G. Mansoori. “Modeling and prevention of asphaltene and other heavy organic deposition in Oil”. *SPE Latin America/Caribbean Petroleum Engineering Conference*. abril 1994. ISBN: 978-1-55563-470-4. DOI: 10.2118/27070-doiMS.

[5] F. García. “Factor de fricción para flujo bifásico de gas y de líquido en tuberías horizontales para régimen laminar y turbulento”. Universidad Central de Venezuela, pp. 121. 2003.

[6] J. García y F. García. “Efecto de la viscosidad y de la densidad de mezcla en el gradiente de Presión de flujo de gas-líquido en

- tuberías horizontales”. *Información Tecnológica*. Vol. 20 N° 4, pp. 95-106. 2009. ISSN 0718-0764. DOI: 10.4067/S0718-07642009000400011.
- [7] M. Haoulo, F. García y J. Soto. “Gradiente de presión de flujo de gas y líquido en tuberías horizontales considerando el efecto de las propiedades de mezcla”. *Revista de la Facultad de Ingeniería*. Universidad Central de Venezuela. Vol. 20 N° 4, pp. 5-22. octubre 2005. ISSN 0798-4065.
- [8] K. Kavi, A. Jafar and K. Dara. “Modeling the Flow of Crude Oil in Cracked Pipeline”. *International Journal of Scientific Research in Science and Technology*. Vol. 7 N° 4, pp. 226-233. 2020. ISSN: 499-509.
- [9] K. Wójs. “Laminar and turbulent pipe flow of a polymer solution”. *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*. Vol. 48 N° 3, pp. 337-355. 1993. ISSN: 2395-602X.
- [10] A. Falconi, H. Laurencio and E. Torres. “Model of pressure losses in pipes during the transport of heavy oil with 11 API gravity”. *International Journal of Mechanics*. Vol. 12 N° 1, pp. 8-13. 2018. ISSN: 1998-4448.
- [11] G. Gardea. “Dos propuestas para el proyecto del bombeo de fluidos no newtonianos. Caso de los lodos residuales de plantas de tratamiento de aguas negras”. *Ingeniería, Investigación y Tecnología*. Vol. 9 N° 2, pp. 87-97. 2008. ISSN: 2594-0732. DOI: 10.22201/ifi.25940732e.2008.09n2.008.
- [12] B. Nekrasov. “Hidráulica”. Editorial MIR. Moscú, Rusia. 1990.
- [13] L. Garcell. “Flujo por tuberías de suspensiones minerales no newtonianas. Apuntes para una monografía”. 2001.
- [14] V. Streeter, E.B. Wylie y K. Bedford. “Mecánica de fluidos”. Novena Edición. McGraw-Hill. Bogotá, Colombia. 2000.
- [15] F. García y M. Haoulo. “Estudio experimental de patrones de flujo bifásico aire-agua en tuberías horizontales y ligeramente inclinadas”. *Información Tecnológica*. Vol. 20 N° 3, pp. 3-12. 009. DOI: 10.4067/S0718-07642009000300002