

Minería & Geología

Minería y Geología

ISSN: 0258-8959

revistamg@ismm.edu.cu

Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa

'Dr Antonio Nuñez Jiménez'

Cuba

Laurencio-Alfonso, Héctor Luis; Falcón-Hernández, José; Retirado-Mediaceja, Yoalbys; Pérez-Maliuk, Olga

Modelo para cálculo de pérdidas de presión en tuberías conductoras de petróleo pesado (11° API)

Minería y Geología, vol. 28, núm. 3, 2012, pp. 70-86

Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa 'Dr Antonio Nuñez Jiménez'

Holguín, Cuba

Disponible en: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=223523811004>

- Cómo citar el artículo
- Número completo
- Más información del artículo
- Página de la revista en redalyc.org

redalyc.org

Sistema de Información Científica

Red de Revistas Científicas de América Latina, el Caribe, España y Portugal

Proyecto académico sin fines de lucro, desarrollado bajo la iniciativa de acceso abierto

Modelo para cálculo de pérdidas de presión en tuberías conductoras de petróleo pesado (11° API)

Héctor Luis Laurencio-Alfonso
José Falcón-Hernández
Yoalbys Retirado-Mediceja
Olga Pérez-Maliuk

Resumen

Durante el transporte de petróleos pesados por tuberías se presentan dificultades relacionadas a su elevada viscosidad con comportamiento no newtoniano, afectando de forma directa el rendimiento de las instalaciones de transporte, como consecuencia de las imprecisiones de las metodologías de cálculo. En el presente trabajo se desarrollan relaciones funcionales que describen las variaciones de presión para flujo de petróleo no newtoniano en tuberías; obtenidas a partir de las limitaciones de metodologías y correlaciones empíricas para la evaluación de los efectos simultáneos de la fuerza viscosa y de mezcla en el régimen laminar durante el transporte de fluidos por tuberías. El estudio experimental se realiza a partir de la caracterización en cuanto al comportamiento reológico del petróleo, realizando la modelación para un comportamiento seudoplástico. El modelo obtenido constituye la base del cálculo para la selección, evaluación y racionalización del proceso de transporte por tuberías del petróleo pesado, en relación con las propiedades físicas del fluido.

Palabras clave

Petróleo pesado; comportamiento reológico; gradiente de presión.

Model for the calculation of pressure loss through heavy fuel oil transfer pipelines

Abstract

Considering the limitations of methodologies and empirical correlations in the evaluation of simultaneous effects produced by viscous and mix strength during the transfer of fluids through pipelines, this article presents the functional relationships that describe the pressure variations for the non-Newtonian fuel oil flowrate. The experimental study was conducted based on a characterization of the rheological behavior of fuel oil and modeling for a pseudoplastic behavior. The resulting model describes temperature changes, viscous friction effects and the effects of blending flow layers; which is therefore the basis of calculation for the selection, evaluation and rationalization of transport of heavy fuel oil by pipelines.

Keywords

Heavy fuel oil; rheological behavior; pressure gradient; pipeline transfer

1. INTRODUCCIÓN

Uno de los problemas del transporte del petróleo crudo pesado consiste en que son fluidos de elevada viscosidad con comportamiento no newtoniano (Laurencio 2010). Por otra parte, los métodos para la estimación de las pérdidas de carga en tuberías se basan enteramente en estudios y correlación de datos experimentales, lo que evidencia ciertas desviaciones entre los resultados de las simulaciones computacionales y los valores experimentales (Turro 2002; Laurencio 2007).

En tal sentido, Mansoori (2005) describe la conducta electrocinética de ciertos crudos vinculándolos con la fluidodinámica, y 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. Esa diferencia de potencial se opone al flujo multifásico por las tuberías, como resultado de la cual las partículas tienden a contrafluir.

Relacionado con los modelos para la estimación de pérdidas de carga en tuberías, Wojs (1993) desarrolló una ecuación teórico-experimental al realizar estudios friccionales en tuberías lisas y rugosas con soluciones diluidas de polímeros; aunque la ecuación concuerda adecuadamente con los resultados experimentales su aplicación aún se encuentra limitada por estar el factor de fricción de Darcy implícito en la ecuación del factor de fricción.

Turro (2002) propone un sistema de correlaciones para el cálculo y evaluación de las instalaciones de hidrotransporte de colas, provenientes de los resultados de la caracterización realizada al fluido y al sistema de transporte; no tiene en cuenta el estado no estacionario del proceso, pues no se contempla en el modelo general el gradiente de temperatura durante el recorrido del fluido.

Entre las investigaciones relacionadas con el transporte de petróleos pesados por tuberías se destaca el realizado por Liang (1999); en el mismo se exponen los resultados del transporte de crudo tratado magnéticamente, a grandes distancias, a través de oleoductos, mostrándose resultados satisfactorios con relación a la disminución de la pérdida de carga.

También se han desarrollado trabajos que no tienen en cuenta los criterios de semejanza, los cuales son importantes a la hora de extrapolar los resultados a escala industrial (Placencia & Martínez 2000; Martínez & Eguez 2001), pero en la actualidad no puede prescindirse de

estas investigaciones porque contienen conclusiones substanciales en el sentido de la aplicación de las propiedades reológicas de los petróleos al transportarse por tuberías.

Resultados reportados por García (2003) muestran diferencias significativas en la predicción del gradiente de presión entre modelos homogéneos, cuya única diferencia es la forma de evaluar la viscosidad de mezcla de petróleo. Haoulo y García (2004) observaron un marcado efecto de la densidad de mezcla en el gradiente de presión, debido a los cambios de energía cinética y adicionalmente evaluaron el efecto de la viscosidad del líquido en el gradiente de presión total en las tuberías.

Haoulo *et al.* (2005) evalúan el efecto de la densidad y la viscosidad dinámica de mezclas de petróleo en la determinación del gradiente de presión longitudinal, para el flujo de petróleo en tuberías horizontales, considerando un fluido seudohomogéneo. García y Haoulo (2007) realizan un estudio teórico-experimental para evaluar diferentes modelos empíricos y mecanicistas utilizados comúnmente para predecir patrones de flujo bifásico de petróleo en tuberías horizontales y ligeramente inclinadas.

En tanto Frigaard *et al.* (2007) proponen los modelos de desplazamiento por tubería de un petróleo crudo; los mismos son aplicables a diferentes regímenes de flujo (transición, laminar y turbulento), considerando diferentes diámetros de tubería.

Japper *et al.* (2009) analizan el flujo de polímeros en tuberías; para el caso en estudio se determinó la relación del factor de fricción mediante la experimentación del gradiente de presión, para mezclas newtonianas y no newtonianas del tipo seudoplásticas. Las correlaciones obtenidas fueron expresadas en función del número de Reynolds, evidenciándose ciertas desviaciones del modelo tradicional en el caso del régimen laminar, atribuidas al efecto de esfuerzos de cortes perpendiculares a la velocidad del fluido en la tubería; efectos manifestados en los líquidos de elevada viscosidad.

La mayoría de las investigaciones precedentes abordan la fenomenología de fluidos no newtonianos, que aunque sirven de base para la investigación, no describen en la totalidad el fenómeno de transporte de fluidos con intercambio térmico y las irregularidades del flujo en régimen laminar. Teniendo en cuenta lo anterior, el objetivo del presente artículo fue obtener un modelo para estimar las pérdidas de presión en las tuberías durante el transporte de petróleos pesados.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1 Procedimientos para la determinación del gradiente de presión 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 (Gardea 2008).

La obtención del modelo para el transporte de petróleo en tuberías se elabora a partir del uso simultáneo de las ecuaciones de balance de masa, momento y energía, considerándose los efectos de los esfuerzos de mezclado entre capas del fluido (García 2003; Mansoori 2005; Japper *et al.* 2009). Para el análisis de las fuerzas que intervienen en el proceso de transporte se consideró una sección de tubería inclinada, con movimiento del fluido hacia arriba y un ángulo (θ) desde la horizontal (Figura 1).

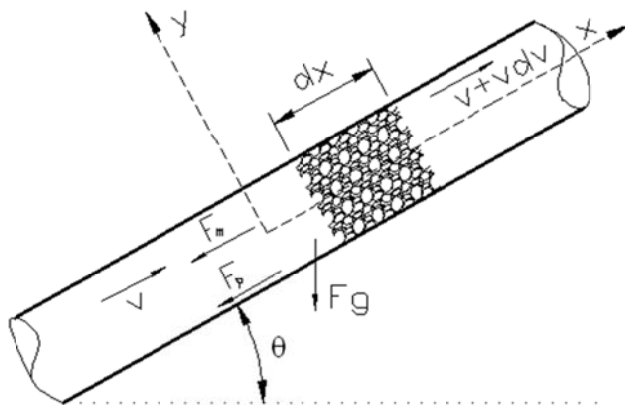


Figura 1. Esquema estructural utilizado en la obtención del modelo.

Al modelo de flujo homogéneo referenciado por Haoulo *et al.* (2005) se le adicionó el gradiente de presión causado por el mezclado de capas del fluido en la tubería, la ecuación básica de conservación del momento del modelo homogéneo para flujo en tuberías, con la modificación antes relacionada se expresa como:

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

Donde:

A : área de la sección transversal; m^2 .

P : perímetro de la tubería; m .

ρ : densidad del fluido; kg/m^3 .

θ : ángulo de inclinación de la tubería; grados sexagesimales.

dp/dx : gradiente de presión en la dirección del flujo; Pa/m .

τ_p : esfuerzo de corte en la pared de la tubería; Pa .

g : aceleración de gravedad; m/s^2 .

F_m - esfuerzo de presión adicional en la tubería, Pa/m .

El esfuerzo (F_m) es causado por efecto de mezclado entre capas de fluido, incrementándose en el régimen turbulento y en tuberías de diámetros relativamente grandes (incremento del recorrido radial de las partículas en la tubería). Al no tenerse en cuenta este efecto se simula la caída de presión con errores superiores al 25 % (Laurencio 2007).

Al desarrollar el lado izquierdo de la ecuación (1), las derivadas totales también llamadas derivadas materiales, son:

$$\frac{dv}{dt} = \frac{\partial v}{\partial t} + v \frac{\partial v}{\partial x} \quad (2)$$

Al trabajar con un flujo permanente, la derivada parcial con respecto al tiempo se anula, resultando:

$$\frac{dv}{dt} = v \frac{\partial v}{\partial x} \quad (3)$$

Sustituyendo la ecuación (3) en (1) y presentándola como una ecuación explícita en términos del gradiente de presión se tiene que:

$$\frac{dp}{dx} = \frac{P \cdot \tau_p}{A} + F_m + \rho \cdot v \cdot \frac{dv}{dx} + \rho \cdot g \cdot \sin \theta \quad (4)$$

Donde:

v : velocidad del fluido; m/s .

En la ecuación (4) el gradiente de presión longitudinal total en la tubería se divide en cuatro componentes.

$$\frac{dp}{dx} = \left(\frac{dp}{dx}\right)_v + \left(\frac{dp}{dx}\right)_m + \left(\frac{dp}{dx}\right)_a + \left(\frac{dp}{dx}\right)_g \quad (5)$$

El primer componente $[(dp/dx)_v]$ es el gradiente de presión debido al esfuerzo viscoso del fluido con la pared de la tubería, es costumbre asumir este como la pérdida de carga total de la tubería. Este gradiente para un fluido no newtoniano en flujo permanente, con un diámetro constante, se obtiene partiendo de un análisis de la distribución de esfuerzos cortantes en una tubería (Laurencio, 2007).

La ecuación que describe el gradiente de presión debido al esfuerzo de corte entre el fluido y la pared de la tubería se representa por:

$$\left(\frac{dp}{dx}\right)_v = 2 \cdot K \cdot \left(\frac{3 \cdot n + 1}{n} \cdot \frac{4}{\pi \cdot D^2}\right)^n \cdot \left(\frac{2}{D}\right)^{n+1} \cdot Q^n \quad (6)$$

Donde:

Q: flujo volumétrico; m³/s.

D: diámetro de la tubería; m/s.

El segundo componente $[(dp/dx)_m]$ es el gradiente de presión adicional por efectos de mezclado del fluido en la tubería; puede estimarse mediante la ecuación de Darcy-Weisbach.

$$\left(\frac{dp}{dx}\right)_m = \lambda^* \cdot \frac{1}{D} \cdot \frac{v^2}{2} \cdot \rho \quad (7)$$

Donde:

λ^* : coeficiente de fricción por rozamiento adicional del fluido; adimensional.

En este caso, λ^* representa los efectos adicionales del gradiente de presión en régimen laminar, manifestados en tuberías de gran diámetro (efecto de mezcla del flujo que no son contemplados por la ecuación 6) y se determina por experimentación, correlacionándolo con el número generalizado de Reynolds, Re^* (ecuación 8).

$$\lambda^* = \frac{a}{\text{Re}^{*b}} \quad (8)$$

Donde:

a y b : coeficientes que dependen del régimen del fluido y de las características propias de este; se determina de forma experimental para cada fluido.

Sustituyendo la ecuación (8) en la (7) y expresándola en función del flujo volumétrico (Q), resulta:

$$\left(\frac{dp}{dx}\right)_m = \frac{a}{\text{Re}^{*b}} \cdot \frac{8 \cdot \rho \cdot Q^2}{\pi^2 \cdot D^5} \quad (9)$$

Donde:

Re^* : número generalizado de Reynolds; adimensional.

El tercer componente $[(dp/dx)_d]$ es el gradiente de presión debido a los cambios de densidad por variaciones de temperaturas en el fluido, el mismo ha sido considerado por García y Haoulo (2008) para el cambio de propiedades de mezcla de fluidos (ecuación 10).

$$\left(\frac{dp}{dx}\right)_a = \left(\frac{m}{A}\right)^2 \cdot \frac{d}{dx} \cdot \left(\frac{1}{\rho}\right) \quad (10)$$

Donde:

m : flujo másico; kg/s.

Resolviendo la ecuación (10) y expresado en términos del flujo másico se obtiene:

$$\left(\frac{dp}{dx}\right)_A = \frac{v^2}{L} \cdot (\rho_f - \rho_i) \quad (11)$$

Donde:

ρ_f y ρ_i : Son las densidades final e inicial del petróleo durante el transporte por las tuberías cuando existe enfriamiento; kg/m³.

Expresando la ecuación (11) en función del flujo volumétrico, se obtiene:

$$\left(\frac{dp}{dx}\right)_A = \frac{16 \cdot Q^2}{\pi^2 \cdot L \cdot D^4} \cdot (\rho_f - \rho_i) \quad (12)$$

La ecuación (12) es función de la densidad de la mezcla utilizada y se debe tener en cuenta para flujo con temperatura no estacionaria, en el caso que las variaciones de temperatura sean significativas; para variaciones pequeñas de densidad el término puede ser despreciado.

El cuarto componente $[(dp/dx)_G]$ es debido a los cambios de energía potencial como consecuencia de las variaciones de la inclinación de la tubería. En el caso de tubería horizontal este gradiente de presión se anula.

$$\left(\frac{dp}{dx}\right)_G = \rho \cdot g \cdot \sin\theta \quad (13)$$

Del análisis realizado y sustituyendo las ecuaciones (13), (12), (9) y (6) en la ecuación (5); se obtiene la expresión del gradiente de presión para el transporte del petróleo pesado por tuberías. El modelo cumple con el comportamiento de un fluido pseudoplástico, lo que queda explícito, como se muestra en la ecuación (14):

$$\frac{dp}{dx} = \left[2K \cdot \left(\frac{3 \cdot n + 1}{n} \cdot \frac{4}{\pi \cdot D^2} \right)^n \cdot \left(\frac{2}{D} \right)^{n+1} \cdot Q^n + \frac{a}{Re^{*b}} \cdot \frac{8 \cdot \rho \cdot Q^2}{\pi^2 \cdot D^5} + \dots \right] + \frac{16 \cdot Q^2}{\pi^2 \cdot L \cdot D^4} \cdot (\rho_f - \rho_i) + \rho \cdot g \cdot \sin\theta \quad (14)$$

Expresando la ecuación (14), en diferencia de presión y sustituyendo $\sin\theta = \Delta Z / L$, la ecuación resultante es:

$$\Delta p = \left[2 \cdot K \cdot L \cdot \left(\frac{3 \cdot n + 1}{n} \cdot \frac{4}{\pi \cdot D^2} \right)^n \cdot \left(\frac{2}{D} \right)^{n+1} \cdot Q^n + \frac{a}{Re^{*b}} \cdot \frac{8 \cdot L \cdot \rho \cdot Q^2}{\pi^2 \cdot D^5} + \dots \right] + \frac{16 \cdot Q^2}{\pi^2 \cdot D^4} \cdot (\rho_f - \rho_i) + \rho \cdot g \cdot \Delta Z \quad (15)$$

El modelo obtenido (ecuación 15) una vez identificado y validado, tienen gran aplicación práctica en la obtención de la variación de presión 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.

2.2 Técnica experimental

La investigación de los parámetros y regímenes de transportación se realizó a escala industrial. La instalación está dotada de equipos y accesorios que permiten mayor 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 63 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. Mediante la obtención de los gradientes de presión se elaboró el gráfico de la pendiente hidráulica ($i = f(Q)$) para el flujo del combustible durante el transporte por tuberías.

Con la obtención del gráfico $\lambda = f(Re)$, a partir del procedimiento descrito en Figura 1, 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.

2.3. Número de corridas experimentales

El número de corridas experimentales se determinó a partir de la aplicación de un diseño multifactorial. En compromiso con los niveles determinados de cada variable se establecen como mínimo ocho niveles del flujo volumétrico en dos diámetros de tuberías, para dos replicas de los experimentos. La variable temperatura se toma según su comportamiento aleatorio en el sistema de transporte.

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 caída de

presión y el valor teórico " X_{teo} " obtenido por el modelo para las mismas condiciones del experimento. El error relativo puntual (E_p) se calcula por la siguiente expresión:

$$E_p = \left| \frac{X_{exp} - X_{teo}}{X_{exp}} \right| \cdot 100 \quad (16)$$

2.4. Instrumentación utilizada

La instalación experimental consta de los siguientes instrumentos:

1. Flujómetro ultrasónico
2. Manómetros y vacuómetros
3. Termopares.

2.5. Proceso de identificación del modelo

Para realizar el ajuste del modelo que estima la caída de presión durante el transporte por tuberías se seleccionan los parámetros reológicos del petróleo para diferentes temperaturas, los que se muestran en la Tabla 1.

Tabla 1. Parámetros reológicos

No	Parámetros	Temperatura				
		29 °C	38,6 °C	50,2 °C	57,4 °C	69,8 °C
1	n (adimensional)	0,917	0,926	0,926	0,925	0,929
2	K (Pa·s)	13,55	6,89	3,097	2,22	1,46

Fuente: Laurencio, 2010.

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 1.

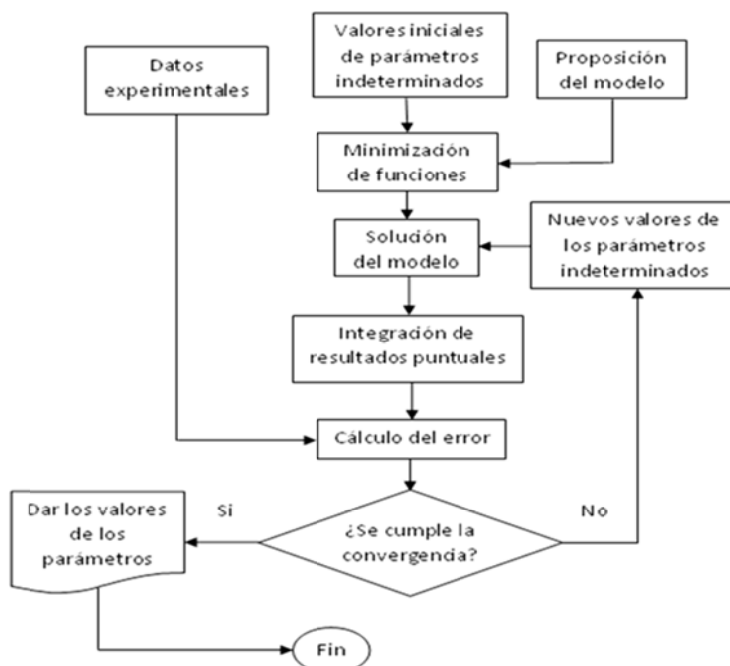


Figura 1. Diagrama para la identificación de los parámetros del modelo de gradiente de presión.

El mejor ajuste de los factores lo proporciona el juego de coeficientes donde se garantiza el error mínimo, por lo que utiliza el procedimiento iterativo a partir del estado de referencia de los datos. El proceso se

utiliza para encontrar los valores de los coeficientes característicos del modelo propuesto (ecuación 15).

3. IDENTIFICACIÓN DEL MODELO PROPUESTO

En la Tabla 2 se relacionan los valores de los datos experimentales, los cuales fueron obtenidos a partir de la relación pendiente hidráulica y velocidad [$i = f(v)$] para el flujo en las tuberías de 0,2 y 0,3 m de diámetro; para cada resultado se determinó el factor de fricción y el número generalizado de Reynolds.

Tabla 3. Resultados experimentales para la identificación del modelo (para la temperatura inicial de 65 °C)

Nº	D (m)	Q (m ³ /s)	i _{EXP.} (Pa/m)	i _{TEO.} (Pa/m)	Error	Δi (Pa/m)	Re*
1	0,2	0,005	162,13	149,02	0,09	13,11	26,73
2		0,010	314,03	281,96	0,11	32,07	56,51
3		0,015	456,72	409,45	0,12	47,27	87,56
4		0,020	612,11	533,51	0,15	78,60	119,46
5		0,025	766,57	655,09	0,17	111,48	152,02
6		0,030	898,40	774,72	0,16	123,68	185,10
7		0,040	1189,06	1009,46	0,18	179,60	252,55
8		0,044	1297,15	1090,45	0,19	206,70	276,50
1	0,3	0,005	34,33	32,44	0,06	1,88	16,17
2		0,010	66,89	61,39	0,09	5,50	34,18
3		0,015	101,39	89,14	0,14	12,24	52,96
4		0,020	131,85	116,16	0,14	15,69	72,26
5		0,025	167,50	142,63	0,17	24,87	91,95
6		0,030	195,19	168,67	0,16	26,51	111,96
7		0,040	258,69	219,78	0,18	38,91	152,76
8		0,044	275,07	237,41	0,16	37,66	167,24

La comparación de los resultados experimentales con los resultados teóricos obtenidos mediante el empleo de la ecuación (6), la que estima la variación de presión en una tubería cuando se transporta un fluido pseudoplástico en régimen laminar; se comportó según los parámetros n y K del modelo reológicos. En las Figuras 2 y 3 se muestran los resultados de la pendiente hidráulica (experimental y teórica) para cada diámetro de tubería analizado.

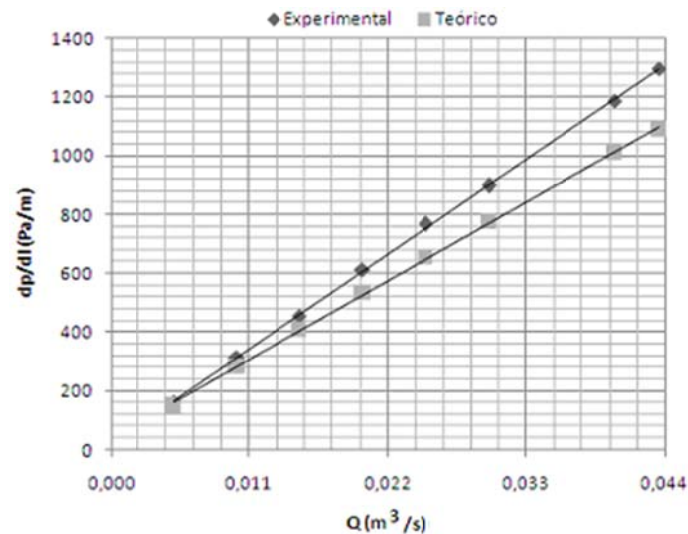


Figura 2. Pérdidas específicas de presión, experimental y teórica en función del flujo volumétrico del petróleo para la tubería de 0,2 m de diámetro.

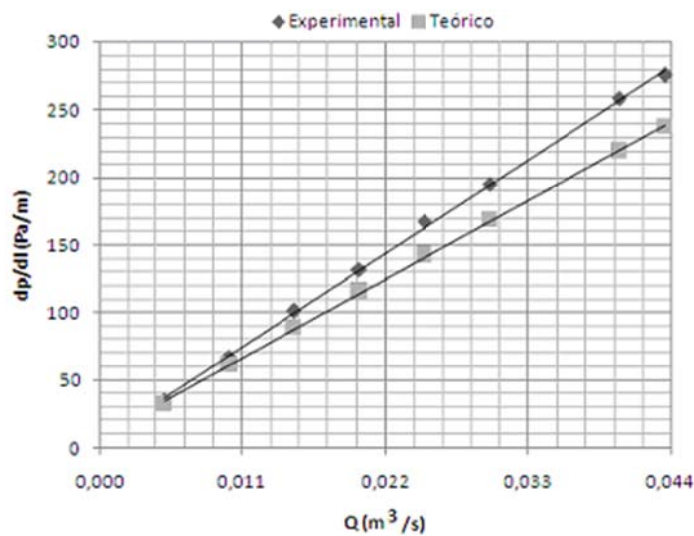


Figura 3. Pérdidas específicas de presión, experimental y teórica en función del flujo volumétrico del petróleo para la tubería de 0,3 m de diámetro.

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 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 (Placencia & Martínez 2000; Martínez & Egüez 2001; García 2003).

3.1. Obtención de los parámetros del modelo

A partir de los resultados mostrados en la Tabla 2 se obtiene la relación de ajuste del modelo, basado en las diferencias encontradas entre los datos experimentales y los valores teóricos calculados. Las diferencias antes mencionadas pueden observarse en la Figura 4.

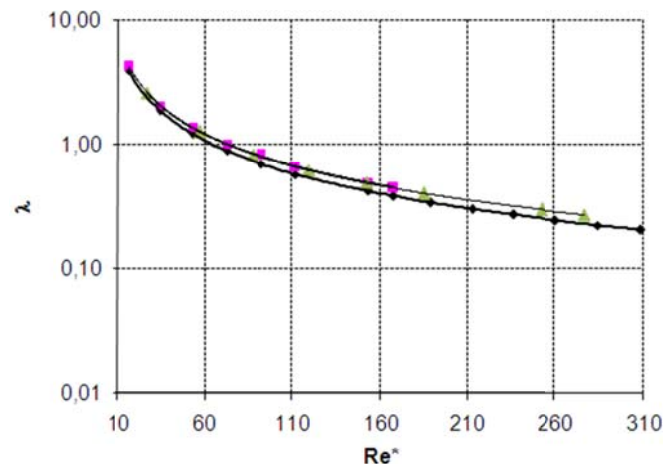


Figura 4. Comparación de la correlación del factor de fricción y el número de Reynolds experimental y el teórico reportado por Gardea (2008).

En la Figura 4 se observa, como tendencia, que el coeficiente de fricción en el caso de flujo con mezcla 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 5.

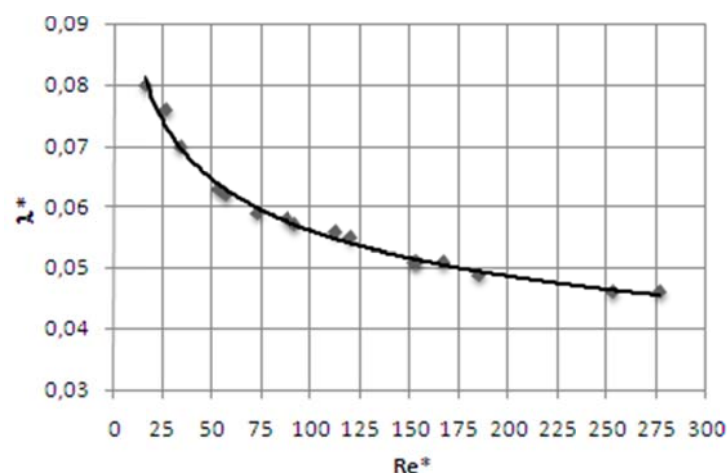


Figura 5. Factor de fricción adicional en función del número de Reynolds.

La correlación obtenida, a partir del análisis de la Figura 5, se expresa como:

$$\lambda^* = \frac{0,14}{Re^{*0,2}} \quad (17)$$

Esta expresión satisface el ajuste de la ecuación (15) 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 presión 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 los tubos y otros fluidos con comportamiento pseudoplástico.

4. CONCLUSIONES

La ecuación (15) constituye el modelo teórico generalizado para el cálculo de las variaciones de presión en el transporte por tuberías de petróleo crudo pesado. El mismo tiene en cuenta la variación de temperatura durante el transporte, los efectos de rozamiento viscoso, y los efectos de mezclado entre capas de flujo.

La identificación del modelo teórico permitió establecer el modelo teórico-experimental (ecuación que se expone a continuación), que describe el proceso de transporte de petróleo crudo pesado por tubería. Este modelo integra las ecuaciones físicas que caracterizan al proceso investigado con las correlaciones experimentales obtenidas para el material analizado.

$$\Delta p = \left[2 \cdot K_{med.} \cdot L_{total} \cdot \left(\frac{16,32}{\pi \cdot D^2} \right)^{0,925} \cdot \left(\frac{2}{D} \right)^{1,925} \cdot Q^{0,925} + \frac{1,12 \cdot L_{total} \cdot \rho_{med.} \cdot Q^2}{\pi^2 \cdot D^5 \cdot Re_{med.}^{*0,2}} + \dots \right. \\ \left. + \frac{16 \cdot Q^2}{\pi^2 \cdot D^4} \cdot (\rho_f - \rho_i) + \rho_{med.} \cdot g \cdot \Delta Z \right]$$

5. REFERENCIAS

- FRIGAARD, I.; VINAY, G. AND WACHS, A. 2007: Model of displacement flow of a crude oil from a pipeline. *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics* 213(6): 499-509. Disponible en: www.sciencedirect.com/science [Consultada: 6 de junio de 2009].
- GARCÍA, F. Y HAOULO, M. 2007: Estudio experimental de patrones de flujo bifásico de gas y de líquido en tuberías horizontales y ligeramente inclinadas. En: 8^{vo} Congreso Iberoamericano de Ingeniería Mecánica. Cusco, Perú. Disponible en: www.revele.com.ve/programas/ [Consultada: 3 de enero de 2008].

- GARCÍA, F. 2003: Factor de fricción para flujo bifásico de gas y de líquido en tuberías horizontales para régimen laminar y turbulento. Tesis de Doctorado, Universidad Central de Venezuela, Facultad de Ingeniería. 121 p.
- GARDEA, H. 2008: 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*. 9(2).
- HAOULO, M. Y GARCÍA F. 2004. Efecto de la viscosidad y de la densidad de mezcla en el gradiente de Presión de flujo de gas-líquido en tuberías horizontales. En: V Congreso Nacional de Ingeniería Mecánica. Mérida, Venezuela, 301-306.
- HAOULO, M.; GARCÍA, F. Y SOTO, J. 2005: 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*, 20(4).
- JAPPER, A.; ESCUDIER, P. AND POOLE, J. 2009: Laminar and turbulent pipe flow of a polymer solution. *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics* 35(5). Disponible en: www.sciencedirect.com/science [Consultada: 30 de octubre de 2009].
- LAURENCIO, H. 2010: Método para la obtención de la temperatura racional de bombeo de petróleos pesados. En: ENERMOA, ISMM, Moa.
- LAURENCIO, H. 2007: Método de cálculo para el transporte de emulsiones de petróleo pesado por tuberías. Tesis de maestría, Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa, 87 p.
- LIANG, C. 1999: Experimental study of the effect of magnetic treatment on crude oil in a pipeline. *Oil & Gas Storage Transport* 9(1).
- MANSOORI, G. 2005: Modeling and prevention of asphaltene and other heavy organic deposition in Oil-SPE 27070.
- MARTÍNEZ, D.; EGÜEZ, F. 2001: Estudio reológico y de flujo para emulsiones de petróleo pesado en agua. Unidad de Investigación y Desarrollo Tecnológico de PETROECUADOR, Facultad de Ingeniería Química.
- PLACENCIA, A. Y MARTÍNEZ, D. 2000: Formulación de emulsiones de petróleo pesado en agua a nivel piloto y estudio de las pérdidas friccionales en tubería. Unidad de Investigación y Desarrollo Tecnológico PETROECUADOR, Quito, Ecuador.
- TURRO, A. 2002: Estudio del hidrotransporte de las colas en el proceso carbonato amoniacal. Tesis de doctorado, Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa, 154 p.
- WOJS, K. 1993: Laminar and turbulent flow of dilute polymer solutions in smooth and rough pipes. *Journal of non Newtonian fluid mechanics* 48(2): 337-355.

Héctor Luis Laurencio-Alfonso

Máster en Electromecánica. Profesor Asistente.
Departamento de Ingeniería Mecánica.
Instituto Superior Minero Metalúrgico, Holguín, Cuba.

hlaurencio@ismm.edu.cu**José Falcón-Hernández**

Doctor en Ciencias Técnicas. Profesor Titular.
Departamento de Ingeniería Química.
Universidad de Oriente, Santiago de Cuba, Cuba.

falcon@fiq.uo.edu.cu**Yolbys Retirado-Mediacaja**

Máster en Electromecánica. Profesor Asistente.
Departamento de Ingeniería Mecánica.
Instituto Superior Minero Metalúrgico, Holguín, Cuba.

yretirado@ismm.edu.cu**Olga Pérez-Maliuk**

Ingeniera metalúrgica. Profesora Instructora.
Departamento de Ingeniería Mecánica.
Instituto Superior Minero Metalúrgico, Holguín, Cuba.

operezm@ismm.edu.cu