

## 12º CONGRESO IBEROAMERICANO DE INGENIERÍA MECÁNICA Guayaquil, 10 a 13 de Noviembre de 2015

### CÁLCULO DE LA CAÍDA DE PRESIÓN EN UN OLEODUCTO DE PETRÓLEO CRUDO MEDIANTE LA ECUACIÓN DE ASEGURAMIENTO DE FLUJO

**Torres González E. V.\* , Lugo Leyte R.\* , Lugo Méndez H. D.\* ,  
Salazar Pereyra M.º , Vargas Vázquez J. G.ºº , Paredes Ramírez J. C.\***

\*Área de Ingeniería en Recursos Energéticos, Departamento de Ingeniería de Procesos e Hidráulica, Universidad Autónoma Metropolitana – Iztapalapa, Av. San Rafael Atlixco No. 186, Col. Vicentina, 09340, Iztapalapa, D.F., México.

e-mail: etorres@xanum.uam.mx, lur1@xanum.uam.mx, helenlugomendez@gmail.com

º División de Ingeniería Mecatrónica e Industrial, Tecnológico de Estudios Superiores de Ecatepec, Av. Tecnológico, Esq. Av. Hank González, Col. Valle de Anáhuac, 55210, Ecatepec, Estado de México, México.

e-mail: msalazar@tese.edu.mx

ºº MAVAZCAR S.A. de C.V., Suministro, Servicios e Ingeniería, Manzana 36, Casa No. 4, 3era. Etapa, Col. Lázaro Cárdenas del Río, 86600, Paraíso, Tabasco, México.

**PALABRAS CLAVE:** Caída de presión, Oleoducto, Petróleo

#### RESUMEN

La transportación del petróleo crudo es una parte importante a considerar para la realización de operaciones en refinerías y plantas industriales. Durante el movimiento de este fluido siempre ocurre fricción, en oleoductos y con diferentes accesorios (válvulas, bombas, codos, etc.), ocasionando caídas de presión, de tal manera que, es importante conocer esta pérdida de presión y los factores que la provocan para determinar: el diseño del sistema de oleoductos; las condiciones apropiadas para la operación de los sistemas de bombeo; y las labores de mantenimiento. En el presente trabajo se realizó un análisis paramétrico para conocer las caídas de presión en un oleoducto que transporta petróleo crudo. Los parámetros considerados para realizar esta variación fueron: características del sistema de oleoductos, tales como, la distancia entre centros de bombeo y el diámetro del oleoducto; y las propiedades del petróleo crudo, como su viscosidad cinemática, temperatura y densidad. Los resultados encontrados muestran que la pérdida de presión aumenta con el incremento en la distancia de los centros de bombeo, el aumento del diámetro de la tubería, con una mayor viscosidad cinemática del petróleo crudo, la disminución de la temperatura del petróleo crudo ligero, y un aumento de la densidad del petróleo crudo.

## INTRODUCCIÓN

En el último cuarto del siglo 20, se tuvo una demanda mundial de petróleo crudo a una tasa de crecimiento anual con pocas variaciones representando un promedio de 1%. Por otra parte, en los inicios del siglo XXI, se tuvo como resultado un crecimiento en la demanda de petróleo crudo mundial del 1.8% para el 2009. Además, de acuerdo a las perspectivas mundiales de los próximos 20 años, se tiene que al menos el 80% de las necesidades energéticas del mundo serán de petróleo, gas natural y carbón. En consecuencia, el petróleo seguirá siendo la principal fuente de energía para el próximo medio siglo [1].

A lo largo del tiempo, se han tenido complicaciones para satisfacer la demanda de petróleo crudo debido a su alta viscosidad y composición compleja que los hacen difíciles y costosos de extraer, transportar y refinar. Uno de los problemas de la transportación del petróleo crudo radica en las caídas de presión que se generan en el oleoducto debido a que es un fluido de alta viscosidad y con comportamiento no newtoniano. En realidad, la interacción entre remolinos en el fluido y la pared del oleoducto producen las fricciones que ocasionan las pérdidas de presión, de tal manera que, se dificulta que el petróleo crudo fluya [2]. Para superar la fricción, se requiere aumentar la presión del fluido que implica el utilizar bombas de mayor capacidad. Sin embargo, esto no es tan factible debido a que trae un mayor consumo energético y a las condiciones de diseño de los oleoductos que tienen un límite de presión de operación máxima permisible.

Además, los métodos para la estimación de las caídas de presión 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. Con relación a la obtención de modelos para el cálculo de las caídas de presión en tuberías, se tiene que Wojs desarrollo una ecuación teórico-experimental al realizar estudios de la fricción en tuberías lisas y rugosas al transportar soluciones diluidas de polímeros [3]. Por otra parte, Karami y Mowla, por medio de parámetros experimentales, proponen un modelo general para predecir la pérdida de presión en oleoductos, de tal manera que, este modelo utiliza parámetros de operación como: el flujo y la temperatura del petróleo; el diámetro y la rugosidad de la tubería; varios tipos de agentes reductores de la pérdida de presión y su concentración [4].

Por tal motivo, con la caída de presión deducida del teorema dimensional de Buckingham se realiza un análisis paramétrico para conocer las pérdidas de presión en un oleoducto de petróleo crudo en función de la distancia entre centros de bombeo y el diámetro del oleoducto, así como de la viscosidad cinemática, temperatura y densidad del petróleo crudo.

## METODOLOGÍA

Para encontrar una expresión para la caída de presión debida al rozamiento o fricción se utiliza el teorema de Buckingham en base a la Figura 1.

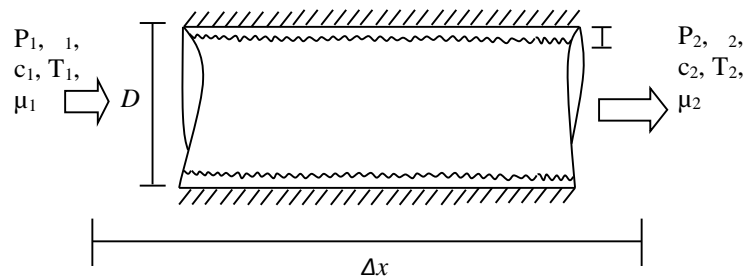


Figura 1: Diagrama esquemático de una tubería con caída de presión.

Este teorema se utiliza para el análisis dimensional y establece que cualquier ecuación homogénea completa que expresa la relación entre “n” variables fundamentales y constantes dimensionales de “r” dimensiones primarias en la forma:

$$f(a, b, c, \dots, n) = 0 \quad (1)$$

tiene una solución expresada como

$$w(f_1, f_2, f_3, \dots, f_n) = 0 \quad (2)$$

donde los  $f_i$  son agrupamientos independientes sin dimensiones, es decir, son adimensionales.

Entonces, con este método se encuentran tres números adimensionales:

- Para la caída de presión

$$f_1 = \left( \frac{dP}{dx} \right) \frac{D}{\rho c^2} \quad (3)$$

- Para el número de Reynolds

$$f_2 = \frac{c D}{\mu} = Re \quad (4)$$

- Para la rugosidad relativa

$$f_3 = \frac{\epsilon}{D} \quad (5)$$

Ahora, sustituyendo las Ec. (3), Ec.(4) y Ec.(5) en la Ec.(2) se obtiene

$$w \left( f_1, f_2, f_3 \right) = w \left( \frac{dP}{dx} \frac{D}{\rho c^2}, \frac{c D}{\mu}, \frac{\epsilon}{D} \right) = 0 \quad (6)$$

entonces

$$\frac{dP}{dx} \frac{D}{\rho c^2} = G \left( \frac{\rho c D}{\mu}, \frac{\epsilon}{D} \right) = G \left( Re, \frac{\epsilon}{D} \right) \quad (7)$$

con

$$G = \frac{f}{2} \quad (8)$$

Por lo tanto, la ecuación de aseguramiento de flujo se expresa de forma diferencial como:

$$dP = - \left( \frac{\rho c^2}{2} \right) f \frac{dx}{D} \quad (9)$$

Entonces, se integra la Ec. (9) realizando las consideraciones de: una tubería recta entre los centros de bombeo; un flujo estacionario; un flujo homogéneo; y una tubería isotérmica, como se muestra en la Figura 1.

Por lo tanto, la ecuación de aseguramiento de flujo queda expresada como

$$\Delta P = - \left( \frac{\rho c^2}{2} \right) f \frac{\Delta x}{D} \quad (10)$$

donde de acuerdo al número de Reynolds encontrado en oleoductos de petróleo crudo, Ec.(4), el flujo es turbulento y no laminar, es decir, el número de Reynolds es mayor de 4,000 y entonces es un flujo turbulento (flujo laminar cuando  $Re < 2,100$ ), de tal manera que, el factor de fricción se encuentra con la ecuación de Churchill:

$$f = 8 \left[ \left( \frac{8}{\text{Re}} \right)^{12} + (A+B)^{-\frac{3}{2}} \right]^{\frac{1}{12}} \quad (11)$$

con

$$A = \left[ 2.457 \ln \left( \frac{1}{\left( \frac{7}{\text{Re}} \right)^{0.9} + 0.27 \left( \frac{v}{D} \right)} \right) \right]^{16}, \quad (12)$$

$$B = \left( \frac{37.530}{\text{Re}} \right)^{16} \quad (13)$$

### CASO DE ESTUDIO

Para calcular la caída de presión del petróleo crudo ligero se tiene los siguientes valores:

-Densidad del petróleo crudo

$$\dots = 0.83 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}, \quad \dots = 0.83 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3} = \left( 0.83 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3} \right) \left( \frac{1 \text{kg}}{1,000 \text{g}} \right) \left( \frac{1,000,000 \text{cm}^3}{1 \text{m}^3} \right) = 830 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}.$$

-Diámetro de la tubería de acero al carbón

$$D = 25 \text{ in},$$

$$D = (25 \text{ in}) \left( \frac{1 \text{in}}{2.54 \text{cm}} \right) = 63.5 \text{ cm}, \quad D = (63.5 \text{ cm}) \left( \frac{1 \text{m}}{100 \text{cm}} \right) = 0.635 \text{ m}.$$

-Rugosidad de la tubería de acero al carbón

$$v = 0.03 \text{ mm}, \quad v = (0.03 \text{ mm}) \left( \frac{1 \text{m}}{1000 \text{mm}} \right) = 0.00003 \text{ m}.$$

-Distancia entre los centros de bombeo

$$\Delta x = 50 \text{ km}, \quad \Delta x = (50 \text{ km}) \left( \frac{1,000 \text{m}}{1 \text{km}} \right) = 50,000 \text{ m}.$$

-Flujo volumétrico o caudal del petróleo crudo ligero

$$\dot{Q} = 199.3 \text{ mbd}, \quad \dot{Q} = \left( 199.3 \times 10^3 \frac{\text{barril}}{\text{día}} \right) \left( \frac{0.16 \text{m}^3}{1 \text{barril}} \right) \left( \frac{1 \text{día}}{24 \text{h}} \right) \left( \frac{1 \text{h}}{3,600 \text{s}} \right) = 0.369 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}.$$

-Viscosidad cinemática del petróleo crudo ligero (Petróleo del Istmo)

$$x = 54.5 \text{ SSU},$$

entonces, la viscosidad cinemática en centistokes (cSt) es

$$\epsilon = \frac{x}{4.6347} = \frac{54.5}{4.6347} = 11.7591 \text{ cSt} = 0.117591 \text{ St} = 0.117591 \frac{\text{cm}^2}{\text{s}},$$

para la viscosidad absoluta o viscosidad dinámica se tiene

$$\epsilon = \frac{\sim}{\dots}, \quad \sim = \epsilon \dots, \quad (14)$$

$$\sim = \left(0.83 \frac{g}{cm^3}\right) \left(0.117591 \frac{cm^2}{s}\right) = 0.09760071 \frac{g}{cm \cdot s} = 0.09760071 \text{ poise}$$

-Factor de fricción

Primero se determina el número de Reynolds para identificar si es flujo laminar o turbulento

$$Re = \frac{\dots c D}{\sim} \quad (15)$$

donde la velocidad del fluido se encuentra mediante la ecuación del flujo volumétrico o caudal

$$\dot{Q} = c A = c \left(\frac{f D^2}{4}\right). \quad (16)$$

Sustituyendo valores

$$c = \frac{\dot{Q}}{A} = \frac{4 \dot{Q}}{f D^2} = \frac{4 \left(0.3690 \frac{m^3}{s}\right)}{f (0.635 m)^2} = 1.1654 \frac{m}{s} = 116.54 \frac{cm}{s}$$

Por lo tanto, el número de Reynolds es

$$Re = \frac{\dots c D}{\sim} = \frac{\left(0.83 \frac{g}{cm^3}\right) \left(116.54 \frac{cm}{s}\right) (63.5 cm)}{0.09760071 \frac{g}{cm \cdot s}} = 62,932.5106$$

Entonces, el factor de fricción se encuentra con la ecuación de Churchill, Ec. (11):

$$f = 0.01995$$

Por lo tanto, de la Ec.(10) de aseguramiento de flujo se tiene

$$\Delta P = -\left(\frac{\dots c^2}{2}\right) f \frac{\Delta x}{D} = -\frac{\left(830 \frac{kg}{m^3}\right) \left(1.1654 \frac{m}{s}\right)^2}{2} (0.01995) \frac{50,000 m}{0.635 m},$$

$$\Delta P = -885,790.61 Pa = -885.79 kPa$$

## ANÁLISIS DE RESULTADOS

Se realiza un análisis paramétrico para conocer el comportamiento de la caída de presión del oleoducto en función del diámetro del oleoducto; la distancia de separación entre los centros de bombeo; la viscosidad cinemática del petróleo crudo; la temperatura y la densidad del petróleo crudo.

La Figura 2 muestra que un incremento en la distancia de separación entre los centros de bombeo ocasiona un aumento de la caída de presión, por ejemplo, para un diámetro de 15 in del oleoducto, la caída de presión aumenta de manera lineal a una razón de 207.49 kPa por cada 1 km. Mientras, que al disminuir el diámetro de la tubería, la caída de presión disminuye, es decir, para una distancia de separación de 50 km y al pasar de un diámetro de 10 in a 15 in, se tiene un descenso en la caída de presión de 12,810.62 kPa por cada 1 in.

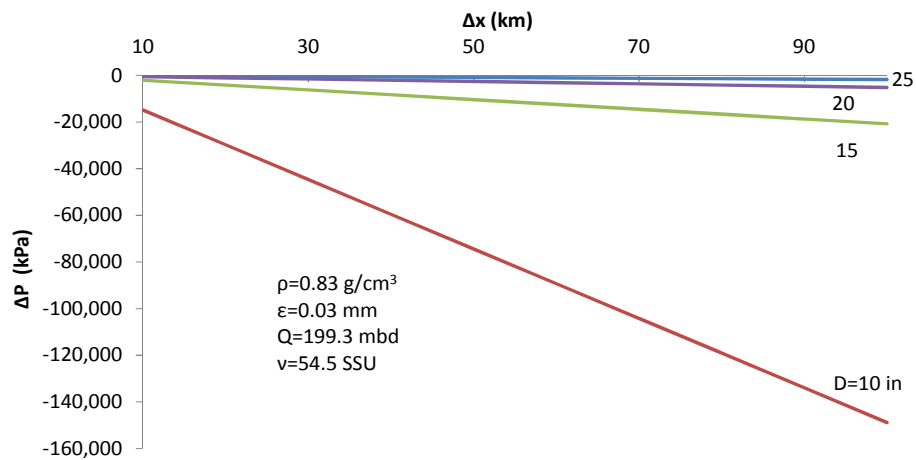


Figura 2: Caída de presión en función de la distancia entre centros de bombeo y del diámetro de la tubería.

Por otra parte, la Figura 3 muestra que un aumento en la viscosidad cinemática del petróleo crudo ligero provoca una caída de presión en la tubería, es decir, el aumento es en forma lineal y por cada 1 SSU se aumenta la caída de presión en 3.22 kPa.

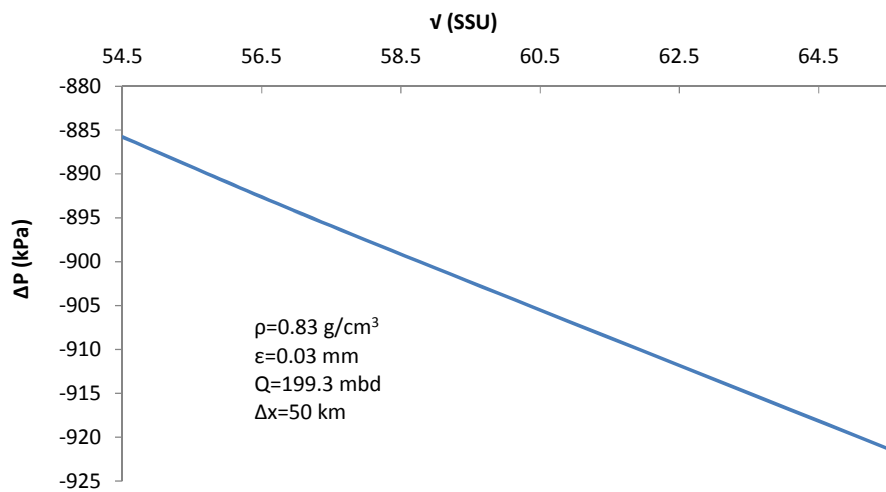


Figura 3: Caída de presión en función de la viscosidad cinemática del petróleo crudo ligero.

Además, la Figura 4 muestra que al aumentar la temperatura del petróleo crudo ligero, la caída de presión disminuye, es decir, por cada 1°C la caída de presión se reduce en 3.81 kPa.

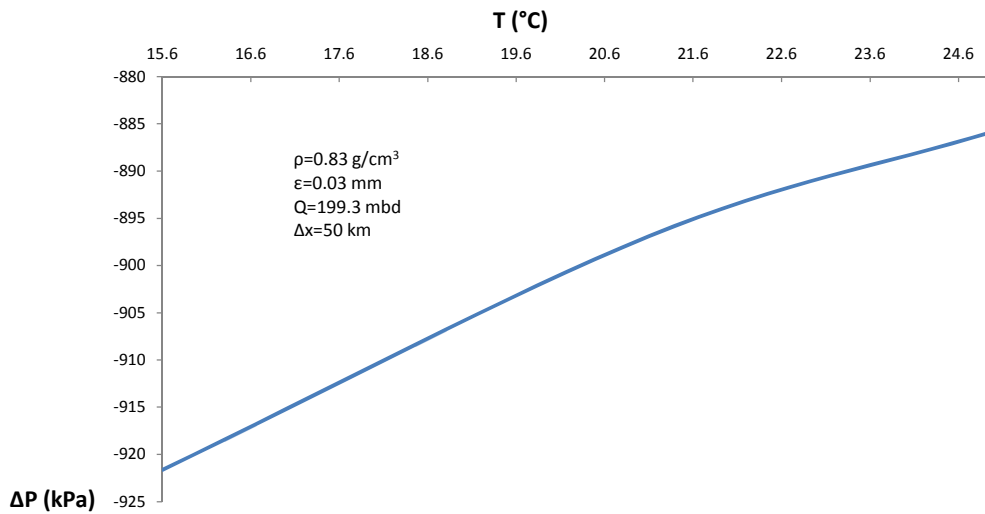


Figura 4: Caída de presión en función de la temperatura del petróleo crudo ligero.

La Figura 5 muestra que un aumento de la densidad del petróleo crudo causa que la caída de presión aumente, es decir, por cada  $0.01 \text{ g/cm}^3$  la caída de presión aumenta en  $1,067.21 \text{ kPa}$ .

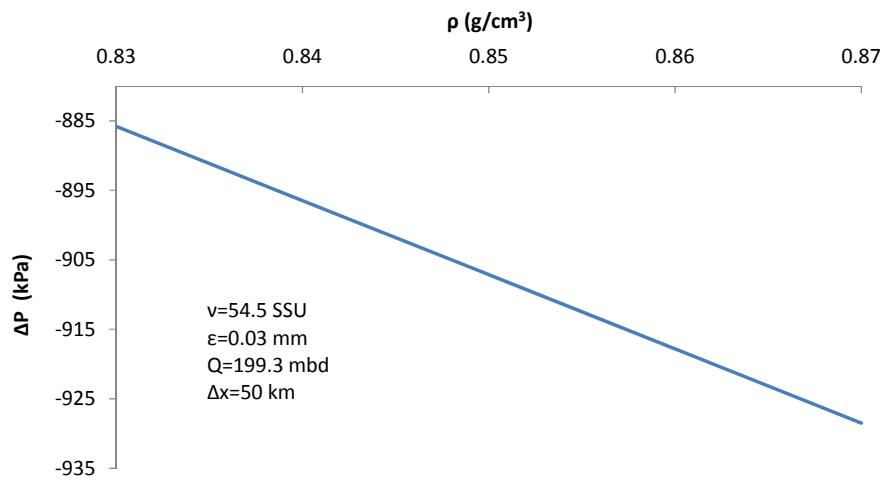


Figura 5. Caída de presión en función de la densidad del petróleo crudo ligero.

## CONCLUSIONES

El diseño de oleoductos involucra un número de pasos progresivos utilizando cálculos hidráulicos para determinar el tamaño adecuado y las características de operación en un sistema de oleoductos, de tal manera que, para diseñar apropiadamente un oleoducto, es necesario entender las condiciones que afectan el fluido. Entonces, los parámetros que deben ser considerados al diseñar un sistema de oleoductos son: características de la tubería; las propiedades físicas del fluido y las caídas de presión, de tal manera que, los resultados de este estudio muestran que la caída de presión en los oleoductos se incrementa en los siguientes casos: al aumentar la distancia entre los centros de bombeo; con un mayor diámetro del oleoducto; al elevarse la viscosidad cinemática del petróleo crudo; una disminución en la temperatura del petróleo crudo ligero; y a mayor densidad del petróleo.

## REFERENCIAS

1. Rafael Martínez-Palou, María de Lourdes Mosqueira, Beatriz Zapata-Rendón, Elizabeth Mar-Juárez, César Bernal-Huicochea, Juan de la Cruz Clavel-López, J. Aburto, Transportation of heavy and extra-heavy crude oil by pipeline: A review, *Journal of Petroleum Science and Engineering*, Vol. 75, pp. 274-282, 2011.
2. H. R. Karami, D. Mowla, Investigation of the effects of various parameters on pressure drop reduction in crude oil pipelines by drag reducing agents, *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, Vol. 177-178, pp. 37-45, 2012.
3. K. Wójs, Laminar and turbulent flow of dilute polymer solutions in smooth and rough pipes, *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, Vol. 48, pp. 337-355, 1993.
4. H. R. Karami, D. Mowla, A general model for predicting drag reduction in crude oil pipelines, *Journal of Petroleum Science and Engineering*, Vol. 111, pp. 78-86, 2013.

## UNIDADES Y NOMENCLATURA

<i>A</i>	área transversal del oleoducto (m <sup>2</sup> )	<i>Letras griegas</i>	
<i>c</i>	velocidad del fluido (m/s)	$\gamma$	viscosidad cinemática (SSU)
<i>D</i>	diámetro del oleoducto (m)	$\epsilon$	rugosidad (mm)
<i>F</i>	dimensión de fuerza (adimensional)	$\mu$	viscosidad dinámica o absoluta (poise)
<i>f</i>	factor de fricción (adimensional)	$\nu$	viscosidad cinemática (centistokes)
<i>L</i>	dimensión de longitud (adimensional)	$\rho$	densidad (g/cm <sup>3</sup> )
	flujo másico (kg/s)	<i>Subíndices</i>	
<i>P</i>	presión (kPa)	<i>1</i>	entrada del petróleo crudo al oleoducto
<i>Q</i>	flujo volumétrico (mbd)	<i>2</i>	salida del petróleo crudo al oleoducto
<i>Re</i>	Número de Reynolds (adimensional)		
<i>T</i>	temperatura del petróleo crudo (°C)		
<i>t</i>	dimensión de tiempo (adimensional)		
<i>x</i>	longitud de la tubería recta (m)		