

SIMULACIÓN DE LA HIDRÁULICA DE BACHES DE DIFERENTES PRODUCTOS DURANTE UNA OPERACIÓN BAJO PERIODO EXTENDIDO

Paula Cuero¹ y Juan Saldarriaga²

¹ Investigadora, Centro de investigaciones en Acueductos y Alcantarillados (CIACUA) Universidad de los Andes.

² Profesor Titular, Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental, Universidad de los Andes.

E-mail: pa.cuero38@uniandes.edu.co, jsaldarr@uniandes.edu.co

Introducción

El transporte de productos de diferentes características a lo largo de una serie de tuberías es una manera comúnmente utilizada en la industria de hidrocarburos, por medio de lo que se conoce como una operación por baches, en la cual se transportan crudos de diferentes características de manera sucesiva a lo largo del ducto como se muestra en la Figura 1. A pesar de que es posible que exista alguna separación física entre los fluidos, éste estudio se enfoca en aquellos en los que se transporta un producto detrás del otro sin separación física, de forma tal que se presenta la formación de una mezcla entre los productos adyacentes conocida como interfaz, esa zona usualmente no cumple con los estándares de calidad de ninguno de los dos productos.

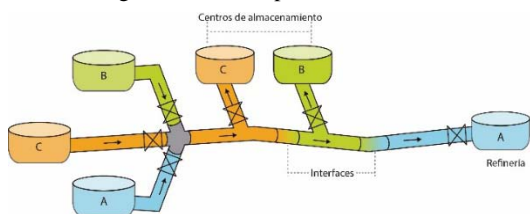


Figura 1.- Representación gráfica de una operación por baches.

El estudio de la magnitud o volumen de la interfaz y de cómo se comporta la línea de gradiente hidráulico (LGH) durante una operación por baches, es un tema de gran relevancia en este tipo de industrias debido a los costos que se atribuyen a la formación de la interfaz y a la energía requerida para su transporte.

En este trabajo se presenta una metodología para simular el comportamiento hidráulico en una tubería durante una operación por baches, realizando una buena aproximación a la magnitud de la mezcla y por ende a la LGH a lo largo del ducto,

Para calcular la magnitud de la interfaz, se han presentado diferentes aproximaciones teóricas y empíricas, los autores más relevantes para estos dos casos han sido Taylor [1], [2] y Austin & Palfrey [3], respectivamente.

Taylor, fue el primer autor en representar de manera teórica la longitud de la mezcla, para esto se basó en que la mezcla se puede representar por medio de la ecuación de difusión de masa de Fick. Para encontrar el valor del coeficiente K el cual integra todos los efectos que favorecen la mezcla, Taylor consideró los efectos de difusión molecular, dispersión radial y dispersión convectiva asociada al perfil de velocidad y despreció la dispersión axial debido a su corta magnitud con respecto a la dispersión convectiva o radial. De manera tal que aplicando estas consideraciones generó para el caso del flujo laminar una expresión para K basada en un perfil parabólico de velocidad.

Para el caso de flujo turbulento, utilizó el perfil de velocidad universal pero éste solo se puede aplicar para números de Reynolds mayores a 20.000, debido a que el perfil de velocidad universal, es adecuado para representar el perfil de velocidad en la zona turbulenta, sin embargo no puede adecuarse al perfil que se presenta en la zona laminar, por lo que solo es aplicable para números de Reynolds en los cuales el tamaño de la subcapa laminar viscosa es despreciable.

Por otra parte se encuentra la aproximación experimental presentada por Austin & Palfrey [3], quienes midieron la longitud

de la interfaz en una gran cantidad de pruebas. Las ecuaciones presentadas por Austin & Palfrey [3] se pueden dividir en dos tipos de flujo, el primero de ellos es el flujo turbulento con números de Reynolds (Re) menores al número de Reynolds crítico (Re_c) calculado con la Ecuación 2, donde la longitud de la interfaz decrece rápidamente con el número de Reynolds, y un segundo tipo para (Re) mayores al (Re_c), de manera tal que la longitud de la interfaz decrece a una tasa más suave. La ecuación para el cálculo de L_I se muestra a continuación.

$$L_I = \begin{cases} \frac{0.3716\sqrt{Ld}}{Re^{0.1}}, & \text{si } Re > Re_c \\ \frac{582.49\sqrt{Ld}e^{2.16\sqrt{d}}}{Re^{0.9}}, & \text{si } Re < Re_c \end{cases} \quad [1]$$

$$Re_c = 10.000 \cdot e^{(2.75\sqrt{d})} \quad [2]$$

Las ecuaciones presentadas tanto teóricas como empíricas son buenas aproximaciones para estimar la magnitud de la interfaz, sin embargo, pueden llegar a generar una sub - estimación de la mezcla si no se consideran productos adyacentes con viscosidades similares, tuberías rectas y horizontales y sin la presencia de accesorios ni estaciones de bombeo.

Metodología

El objetivo principal de éste trabajo es determinar el efecto que tiene la formación de la interfaz en la LGH en un sistema de tuberías, al realizar las simulaciones con o sin la formación de la interfaz, sin embargo para esto se convierte en algo más relevante encontrar un método que permita estimar el volumen de la interfaz en sistemas reales de oleoductos que experimentan variaciones en la topografía, variaciones de temperatura y cambios de diámetro.

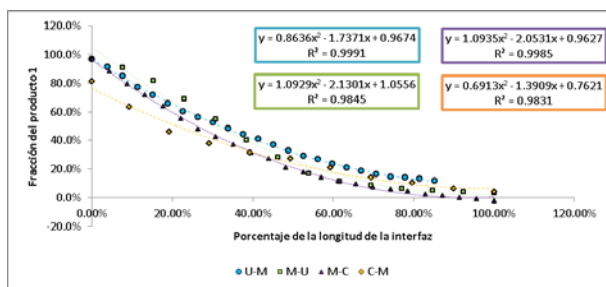
Para esto, se contó con casos de estudio en tuberías reales de oleoductos, de los cuales a través del sistema SCADA se obtuvieron las variaciones de viscosidad minuto a minuto a la entrada y salida de las estaciones de bombeo de los sistemas. Una vez analizada dicha información, se identificaron los patrones más relevantes que impactan el crecimiento de la interfaz de modo tal que se lograra plasmar en una ecuación que represente el fenómeno.

Resultados

A continuación se presentan los patrones identificados que permitieron definir las ecuaciones para estimar la magnitud de la interfaz.

Variación de la viscosidad a lo largo de la interfaz

El cambio progresivo de la densidad se puede explicar como un cambio de la composición porcentual de los dos productos participantes en la mezcla. Se puede graficar el cambio de la fracción f_1 con respecto al porcentaje de la longitud de la interfaz recorrida, en cada punto la siguiente gráfica muestra cómo se da esa variación para la interfaces participantes en el Caso de estudio 3.

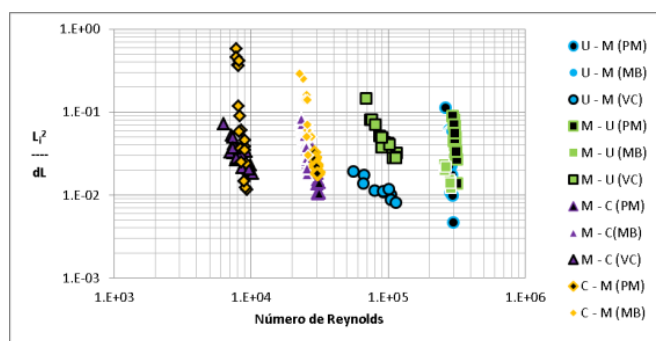


Gráfica 1.- Comportamiento de la fracción del producto 1 a lo largo de la interfaz para el Caso de estudio 3.

Como se puede observar en la gráfica anterior existe una relación cuadrática entre la fracción del producto 1 el porcentaje de la longitud de la interfaz. luego de realizar la evaluación de comportamiento de cerca de 30 interfaces por cada tipo de interfaz en cada oleoducto, se llegó a que los parámetros de la ecuación cuadrática (a, b y c) tienden a ser una constante en cada caso, de modo que se puede obtener para cada interfaz en cada oleoducto

Expresiones para estimar la longitud de la interfaz

En vista de que se deseaba conocer una expresión que representara el cambio de la longitud de la interfaz con respecto al número de Reynolds se realizó un análisis detallado de los datos para identificar ese patrón. De modo que a continuación se muestran las gráficas obtenidas para todas las interfaces en cada uno de los casos de estudio.



Gráfica 2. Pendiente de la curva con respecto a la longitud pendiente promedio para las interfaces M-C y C-M.

Se puede decir que la longitud de la interfaz se puede expresar para cada uno de los ductos y cada una de las interfaces siguiendo la misma relación potencial, pero que el coeficiente y exponente de la ecuación varía con respecto a las características del ducto y a las características de los productos participantes en la interfaz.

Determinación de patrones para la estimación de la longitud de la interfaz

Como se evidenció en las secciones anteriores, existen muchos factores que pueden afectar el comportamiento de cómo crece la interfaz, en esta investigación se encontró que además de los factores de diámetro, viscosidad, régimen de flujo y distancia, en los oleoductos reales, el tamaño de la interfaz se ve influenciado por:

Inclinación de la serie de tuberías: existe una relación con el aumento de la interfaz asociada a una mayor pendiente, sin embargo esta tendencia es más marcada cuando los productos transportados son de menor viscosidad.

Influencia del ciclo de bacheo: Se encontró que para dos productos que van de manera sucesiva a lo largo del ducto la longitud de la interfaz generada para un mismo número de

Reynolds no es la misma si el orden de los productos es distinto. Específicamente la longitud para un número de Reynolds dado es menor si el crudo que ingresa al ducto de primero es el menos denso y ésta relación es más notoria cuando el tipo de mezcla es suave y la diferencia de densidades entre los productos es mayor.

Comparación de la LGH al considerar o no la formación de interfaz: La LGH no se ve afectada (hasta 6%) al considerar la interfaz, y que el efecto es inversamente proporcional al caudal de flujo. Considerar la interfaz para realizar una simulación de la hidráulica en un oleoducto puede no representar un ahorro significativo en energía, sin embargo si puede representar una ventaja operativa para poder agregar menos presión en la bomba sin que la tubería alcance realmente la presión atmosférica y prevenir que se acerca a la máxima presión de operación (MAOP).

Conclusiones

- El cambio progresivo de la viscosidad y densidad a lo largo de la interfaz puede ser expresado como una variación de la composición porcentual de los productos que participan en esta. La manera en la que varía esa relación porcentual se puede representar como una relación polinómica de orden 2.
- Se ha demostrado por medio de este trabajo que es posible determinar expresiones para predecir la longitud de la interfaz en un ducto específico y no se requiere incurrir en altos costos computacionales, sino que es posible obtener dichas expresiones luego de un análisis de datos de densidades medidos al final de cada ducto.
- Se mostró cual es el efecto de la longitud pendiente con respecto a las expresiones encontradas para representar la longitud de la interfaz en función del número de Reynolds, recalando que el número de Reynolds tiene un menor efecto en la longitud de la interfaz cuando la tubería tiene mayor longitud pendiente, lo que se puede explicar en que el perfil de velocidad ya no es el determinante en el crecimiento de la interfaz sino que empiezan a ser las fuerzas gravitacionales las que cobran un mayor efecto.
- Se probó que si existe un efecto del orden en el que los productos ingresan al ducto en la magnitud de la interfaz, se evidenció que si el producto que ingresa de primero al ducto tiene menor densidad que su par, la longitud de la interfaz será menor para un número de Reynolds dado que si fuera el producto más denso el que ingresara primero.
- Calcular la LGH para una serie de tuberías en las que fluyen productos de diferentes características uno tras el otro sin ninguna separación física, considerando la formación de la interfaz permite conocer una LGH adecuada que no subestima la presión en el ducto como sucede en el caso en el que no se considera la interfaz.

Referencias

- Taylor, G., (1954) The Dispersion of Matter in Turbulent Flow Through a Pipe. *Proceedings of The Royal Society A*, 1954. 223: p. 446 - 468.
- Taylor, G., (1953) Dispersion of Soluble Matter in Solvent Flowing Slowly through a Tube. *PROCEEDINGS OF THE ROYAL SOCIETY A*, 219: p. 186 - 203.
- Austin, J.E. and J.R. Palfrey., (1963), MIXING OF MISCIBLE BUT DISSIMILAR LIQUIDS IN SERIAL FLOW IN A PIPELINE. *Proceedings Institut of Mechanical Engeniers*, 178: p. 377 - 389.
- Yongtu, L. and X. Guo, (2011) New approach predicts volume mixing in long, multiproduct pipeline. *Oil and Gas Journal*, 109(18): p. 126-130.