

Análisis de frentes de contaminación en el transporte de hidrocarburos líquidos por tubería

Eddy Ricardo Zárate Neira*

Analysis of contamination in liquids hydrocarbons transport for pipes

RESUMEN

La distribución de productos combustibles es una rama del sistema energético nacional y, por tanto, resulta vital para el desarrollo del país. Esta labor la realiza la Empresa Colombiana de Petróleos (Ecopetrol) a través de las gerencias de Oleoductos y Poliductos de la Vicepresidencia de Transporte (VIT), de las cuales forma parte una extensa red de líneas de transporte que permite trasladar los productos combustibles derivados del petróleo son transportados desde las refinерías hasta los centros de distribución o consumo masivo.

Debido a la gran inversión de capital que representa la planeación, diseño, construcción y mantenimiento de un sistema de transporte de hidrocarburos por tubería, se ha desarrollado una tecnología para trasladar por una sola línea (poliducto¹) distintos productos sin afectar considerablemente sus especificaciones de calidad. Esta tecnología, a pesar de ser relativamente nueva (desde 1900 en adelante), ha sido y seguirá siendo objeto de profundos estudios, tendientes a optimizar los parámetros de operación y minimizar los costos de la misma.

Pese a que éste es el método más rentable de transporte de productos derivados del petróleo, presenta una desventaja obvia cual es la de generar un volumen de producto que por sus características no puede considerarse dentro de las especificaciones de calidad de los productos que lo han formado. Este volumen, casi inherente a la tecnología del sistema y cuya supresión es imposible, sólo se puede reducir a valores técnica y económicamente manejables con la ayuda con ayuda de estudios y políticas de optimización de la operación.

Con este artículo se quieren dar a conocer algunos factores fundamentales en el proceso de optimización del fenómeno descrito y difundir varios aspectos, pautas y conductas de manejo de ciertas variables de operación involucradas en el proceso, así como el uso de correlaciones empíricas en procesos de predicción operacional en líneas de transporte.

PALABRAS CALVE:

oleoducto, poliducto, *batche*, contaminación, interfase.

ABSTRACT

Pipeline contamination is usually understood to mean both the mixing effect produced when two different products transported by the same pipeline come into contact with each other and often the product of such mixing, as well. This product is often referred to as "contamination" or as "interface". Clearly such intermixing is generally less serious in crude carrying, pipelines where each batch can become somewhat polluted by the batches immediately preceding and immediately following without significant damage. However, the situation is different in a finished products pipeline, which may carry products as different as aircraft gasoline and light fuel oils.

This article presents a brief description of the main factors influencing contamination with the objective of optimize conditions operating and to drive the more important respects about them.

KEYWORDS:

oil pipeline, batch, contamination, interface.

* Ingeniero químico de la Universidad Nacional de Colombia.

1. Sistemas de tuberías para el transporte de hidrocarburos.

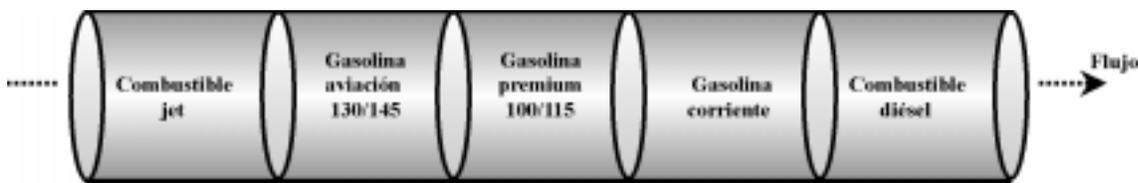


Figura 1. Secuencia típica de bombeo de hidrocarburos a través de poliducto.

INTRODUCCIÓN

El fenómeno de mezcla presentado cuando se transportan diferentes productos por la misma línea (tubería) a causa del contacto de uno y otro fluidos se conoce con la denominación de *frente de contaminación*² o *interfase* [1]. Este frente de contaminación puede no representar ningún tipo de inconveniente en el transporte de diversos tipos de crudos, en donde cada *batche* o *tender*³ se ve levemente afectado por el tipo de crudo que lo antecede y precede, sin constituirse en una situación crítica para el proceso de transporte y valor comercial de los mismos. Sin embargo, la situación es completamente distinta en el transporte de productos ya refinados (gasolina de aviación, gasolina motor, queroseno, combustible diésel, entre otros), para los cuales las especificaciones de calidad son críticas en el valor comercial y técnico de los mismos.

El primer factor que hay que considerar en el bombeo de hidrocarburos refinados utilizando la misma línea de transporte tiene que ver con la planeación previa del orden o secuencia de bombeo de los diferentes productos a través de la línea, con el objetivo de que el frente de contaminación se reduzca tanto como sea posible o en busca de que las consecuencias de contaminación de uno y otro productos no repercutan considerablemente en la alteración de sus especificaciones de calidad.

En la figura 1 se muestra un ejemplo de una secuencia de bombeo [2]: el frente de contaminación de gasolina de RON⁴ 130/145 con gasolina de RON 100/115 puede hacerse parte del producto de RON 100/115, obviamente en este caso con detrimento en el factor

de índole económica (algún volumen de gasolina de RON 130/145 se expende a costo de gasolina RON 100/115); no obstante, en ciertos casos las características de la interfaz no permiten que ésta se considere o incluya en el siguiente o anterior producto del orden de bombeo, a causa de la incompatibilidad en las características de los dos productos, tales como *temperatura final de ebullición*, *octanaje* y *presiones de vapor* en gasolinas y combustible de aviación, con *puntos de inflamación*, *gravedad API* y *temperaturas de ebullición* en querosenos y combustibles diésel; en tales casos la interfaz constituye la piedra angular en el proceso de transporte de cada tender, por lo que debe buscarse la viabilidad de uso del frente de contaminación o, en su defecto, su reprocesamiento en la refinería.

Numerosos estudios en laboratorios y aun en sistemas convencionales de transporte [3] han conducido indudablemente al mejor entendimiento y conocimiento de varios de los factores que pueden tener una relevante influencia en la cantidad de frente de contaminación obtenido en casos particulares. El objetivo se encamina a predecir de alguna manera el volumen de interfaz obtenido en un caso particular de bombeo. Algunas fórmulas y curvas de tipo empírico se han obtenido y propuesto con tal fin, entregando resultados aproximados y relativamente confiables para determinadas condiciones de operación. Los factores más relevantes se han identificado como los que a continuación se detallan, pero el efecto cuantitativo de cada uno de ellos no puede evaluarse fácilmente.

I. FACTORES QUE INFLUYEN SOBRE LA LONGITUD DE LA INTERFASE

A. Velocidad

Se ha comprobado que en condiciones de flujo laminar, en las cuales la distribución de la velocidad a través de

- Operacionalmente, en el área de ingeniería de oleoductos se conoce con esta denominación.
- En ingeniería de oleoductos, corresponde al volumen de un producto en particular que se está transportando por una línea (tubería).
- Research Octane Number (Número de Octano Investigación).

la tubería no es uniforme, la longitud de interfase formada es considerable, a causa de la diferencia entre las velocidades de flujo en cercanías de la pared de la tubería y el centro de la misma, favoreciéndose los efectos difusivos entre los productos en contacto [1]. En condiciones de flujo turbulento, el efecto de la velocidad tiende a disminuir su influencia sobre la longitud del frente de contaminación. No obstante, resultados experimentales en sistemas reales de transporte muestran que la longitud de la interfase puede tener bastante dependencia del número de Reynolds en determinadas condiciones de operación.

B. Diferencia de densidad

Una diferencia en las densidades de los dos fluidos en contacto puede generar un gradiente apreciable entre las fuerzas de inercia de los productos, las cuales tienden a incrementar el volumen del frente de contaminación [1]. El producto más pesado tiende a desplazarse dentro del producto más liviano, aunque el tamaño del frente de contaminación disminuye paulatinamente a la par con el flujo de los productos a lo largo de la línea. El fenómeno se hace más apreciable cuando por alguna razón se detiene el bombeo de los tónderes, sin que éstos hayan alcanzado su sitio de recepción final.

C. Detención o anomalías en el proceso de bombeo



La experiencia muestra que la cantidad de frente de contaminación crece irremediablemente como resultado de detenciones en el proceso de bombeo o anomalías en la velocidad del mismo [2]. Estas fallas o anomalías se hacen más evidentes en el poliducto cuando hay marcadas diferencias de densidad entre productos contiguos, puesto que tales detenciones pueden generar el favorecimiento de fenómenos difusivos e inerciales entre las fases en contacto; además, existen situaciones en las cuales, por la topografía del terreno y su influencia directa sobre el trazado de la línea, se presenta el caso de que bajo una eventual detención del bombeo, la topografía favorezca la migración del fluido más pesado hacia el sitio del fluido más liviano (des-

cuelgue de la línea⁵), fenómeno que incrementa desfavorablemente el volumen de frente de contaminación.

Es recomendable, por tanto, mantener tasas o velocidades de bombeo lo más regulares posibles, con el fin de desfavorecer el incremento en el frente de contaminación.

D. Paso a través de instalaciones

El paso de los fluidos a través de equipos o estaciones de bombeo incrementa frecuentemente el volumen de la interfase [1,2]. Esto a causa del proceso abrupto de cambios de velocidad a que son sometidos los fluidos en dichos puntos del proceso de transporte, favoreciendo en ocasiones el contacto íntimo entre las fases y de la sucesión simultánea de fenómenos de transporte ya mencionados (difusión, mezcla, fuerzas de inercia, etc.).

E. Otros factores

Existen además otros factores que, aunque en menor grado, influyen indirectamente sobre el volumen final del frente de contaminación en el transporte de hidrocarburos líquidos por tuberías; se pueden mencionar factores de índole topográfica del terreno, es decir, los cambios de pendiente que pueda sufrir la línea de transporte durante su viaje desde la(s) refinería(s) hasta el sitio final de recepción, el número de estaciones de bombeo que deba atravesar el poliducto y la cantidad de aditamentos (válvulas, codos, reductores, cambios de diámetro en la línea) típicos en todo sistema de transporte de esta clase [3,4]. Es importante hacer ver que todos estos factores pueden incidir tan marcadamente en el sistema de transporte, que sin lugar a dudas permitirán evaluar la rentabilidad del sistema⁶.

II. PREDICCIÓN DEL TAMAÑO DEL FRENTE DE CONTAMINACIÓN

Las fórmulas empíricas propuestas para predecir la cantidad de frente de contaminación son función directa

5. En situaciones de operación se le da esta connotación al fenómeno presentado *slack line*.
6. No obstante, es el sistema de transporte de hidrocarburos más rentable que existe actualmente.

de la distancia cubierta por los fluidos en el poliducto [3], y usualmente tienen la siguiente forma:

$$l = KL^n \quad [1]$$

Donde:

l: longitud del frente de contaminación en la línea (m).

L: distancia cubierta (m).

K: constante empírica, la cual depende de la identidad de los productos con estudio y del sistema de unidades empleado (tiene un valor cercano a la unidad para los hidrocarburos).

n: constante empírica, la cual depende de la identidad de los productos en estudio y del sistema de unidades empleado (tiene un valor alrededor de 0,5 si *K* se aproxima a la unidad).

Para el sistema de transporte *queroseno / gasolina corriente (RON 84/95)*, se ha encontrado la siguiente expresión [4]:

$$l = 1,10 \cdot L^{0,529} \quad [2]$$

y para el sistema de transporte *gasolina premium / gasolina corriente*, la longitud de interfase encontrada se ajusta a la expresión [4]:

$$l = 0,99 \cdot L^{0,482} \quad [3]$$

A manera de ejemplo, el volumen de frente de mezcla en una distancia de 200 km, a través de un poliducto de 10" de diámetro interno, para el transporte de dos *batches queroseno / gasolina corriente (RON 84/95)* es de aproximadamente 143 m^3 . Para el mismo poliducto, el volumen de mezcla encontrado durante el transporte de dos *batches gasolina premium / gasolina corriente* es de aproximadamente 73 m^3 .

Estudios más recientes [1], confrontados de manera empírica a escala industrial, han conducido a resultados en los cuales se puede relacionar el cambio en el número de Reynolds de una mezcla de volúmenes iguales (volumen de queroseno = volumen de gasolina corriente o premium) de dos productos⁷ bombeados consecutivamente con respecto a la longitud del frente de contaminación y la distancia cubierta.

7. Para el caso en estudio se utilizaron queroseno y gasolinas motor (corriente y premium).

Existen nomogramas que representan las relaciones existentes entre las variables mencionadas anteriormente (número de Reynolds, longitud cubierta, longitud de la interfase) [1,2,3]; sin embargo, uno de los objetivos del presente artículo es proveer herramientas de índole numérica al lector, con la firme convicción de que éstas se utilicen en paralelo con ordenadores personales, (PC) y visualizar de manera más práctica desde la óptica de la ingeniería, con resultados numéricos, el fenómeno ya detallado.

La ecuación empírica 4 se presenta como resultado de un proceso de ajuste de curvas aplicado de modo directo sobre información de índole gráfica [1,3], en el presente caso para bombeo de *batches* de hidrocarburos refinados tipo gasolinas (*premium* y *regular*) y querosenos. Aunque ya se ha trabajado un sinnúmero de expresiones matemáticas utilizadas ampliamente en ingeniería, existen otras que no tienen aplicación al implementarse en procesos de cálculo como el aquí descrito. Los casos especiales y los problemas nuevos (fenómeno presente) requieren a menudo que se obtengan datos propios (como los referenciados en [4]) y que se desarrollen relaciones predictivas, también propias. En el proceso de obtención de la ecuación 4, se aplicó el análisis de tendencias para predecir o pronosticar valores de la variable dependiente - *l* (longitud del frente de contaminación). Por consiguiente, el proceso involucró en su desarrollo extrapolaciones más allá de los límites de los datos registrados en la referencia [4], así como interpolaciones dentro del rango de datos, efecto para el cual se empleó una herramienta de tipo informático (Suite Office - 2000, hoja electrónica Microsoft Excel). En forma posterior, y a manera de prueba de hipótesis, se efectuaron comparaciones del modelo obtenido (ecuación 4) con los datos operacionales registrados con anterioridad -[4]- para probar la eficacia de la expresión obtenida. Cabe aclarar que se pueden obtener modelos alternos y seleccionar el "mejor" con base en observaciones empíricas realizadas sobre operaciones de transporte de otro(s) tipo(s) de hidrocarburos en líneas (sistemas de tuberías) diseñadas para el efecto.

En principio, el problema de obtener la correlación se centraba en la doble dependencia de la longitud del frente de contaminación con respecto al número de Reynolds y a la longitud del poliducto $l = f(Re, L)$; sin

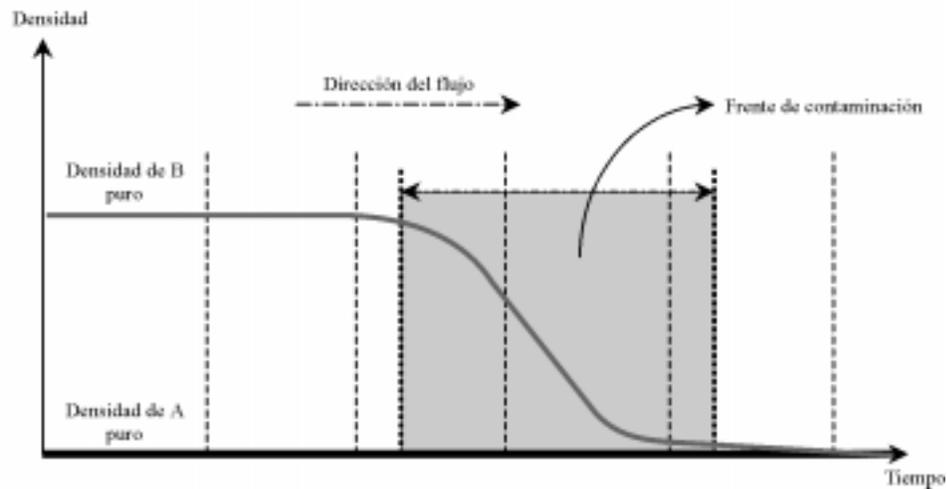


Figura 2. Curva característica de monitoreo de Densidad en un poliducto.

embargo después del trabajo numérico de regresión de curvas se presenta la siguiente correlación:

$$l = [0,0006 \ln(\text{Re}) - 0,0116] L^2 + [-0,292 \ln(\text{Re}) + 7,6042] L - 11,987 \ln(\text{Re}) + 268,91 \quad [4]$$

Donde:

l : longitud del frente de contaminación, en metros (m).

Re : número de Reynolds, adimensional.

L : distancia cubierta, en kilómetros (km).

Es importante aclarar que en principio la ecuación 4 puede usarse para tener un estimativo de la longitud del frente de contaminación; por tanto, la misma no tiene en cuenta los efectos causados por otros factores como irregularidades en la velocidad de bombeo, número de instalaciones en la línea, aditamentos, etc.

En condiciones de operación, la interfase en el sistema de transporte se detecta usualmente a través de un monitoreo de la densidad de cada uno de los *batches* bombeados, en estaciones localizadas en sitios específicos a lo largo de la ruta del poliducto [4]. En la figura 2 se muestra la forma característica de una curva típica de densidad como función del volumen monitoreado en un proceso de bombeo de dos productos con marcada diferencia de densidades (queroseno / gasolina motor) [4]. En algunas situaciones de operación, la curva es útil para encontrar las proporciones en volumen de los productos puros en la secuencia de bombeo. Puede

ocurrir que un operario disponga de la infraestructura física (tanques de recolección, interruptores y válvulas) para que en un momento dado opte por separar individualmente cada uno de los productos, teniendo simultáneamente control sobre el frente de contaminación⁸, lo que a su vez dependerá de la importancia de la interfase para la compañía o de las ventajas de índole económica que se puedan presentar a causa de una reducción en el volumen contaminado [5].

III. CONCLUSIONES

1. Los sistemas de transporte de hidrocarburos líquidos por tuberías (oleoductos, poliductos, combusto-oleoductos) constituyen el medio más rentable económicamente, el más seguro técnicamente y el más confiable desde el punto de vista de la continuidad del suministro.
2. No obstante la inherente formación de un volumen de mezcla en el proceso de transporte de hidrocarburos refinados por tuberías (poliductos), el conocimiento detallado de la operación permite la optimización del proceso a tal punto, que llega a ser técnica y económicamente manejable.
3. Ya existen otras opciones de tratamiento al proceso mencionado con el objetivo de minimizar cada vez más las pérdidas por concepto de frentes de contaminación.
8. Esta maniobra se puede hacer siguiendo un cuidadoso monitoreo de la secuencia de bombeo, con ayuda de gravitógrafos.

minación [4]. Sin embargo, los apartes contemplados hacen parte del oficio diario de miles de personas y compañías del gremio petrolero en el mundo contemporáneo.

BIBLIOGRAFÍA

1. Smith, S. and Schulze, *Interfacial Mixing Characteristics of Products in Products Pipelines*, Petroleum Engineering, septiembre de 1995, 94-104, 5 reprinted.
2. Govier, G.W. and Ritter, R.A., "Pipeline Flow Characteristics of Crude Oils", Ottawa, World Petroleum Congress, junio de 1996.
3. *Oil Pipeline Transportation Practices*, Vol. I, t. IV, Austin, Texas, University of Texas, 1993.
4. Duarte, Francisco, *Estudio sobre las contaminaciones en transporte de hidrocarburos por tuberías*, Bucaramanga, Colombia, Empresa Colombiana de Petróleos (ECOPETROL), Distrito de Oleoductos.
5. Zárate, N. E., Ricardo, *Apuntes de charlas, seminarios y congresos concernientes a la ingeniería de oleoductos*, Bogotá D.C., 1996-2001.