

# Estudio experimental de las pérdidas de presión en un flujo bifásico anular aceite-agua en una tubería vertical ascendente

Irving Néstor Sierra-Sánchez<sup>1</sup>, Florencio Sánchez-Silva<sup>2</sup>, Juan Gabriel Barbosa-Saldaña<sup>3</sup>, Oscar Virgilio Osorio - Díaz<sup>4</sup>, ARTURO REYES LEÓN<sup>5</sup>

<sup>1</sup>LABINTHAP, ESIME Zacatenco, Instituto Politécnico Nacional, México. Email: isieras@ipn.mx

<sup>2</sup>LABINTAHP, ESIME Zacatenco, Instituto Politécnico Nacional, México. Email: fsanchezs@ipn.mx

<sup>3</sup>LABINTHAP, ESIME Zacatenco, Instituto Politécnico Nacional, México. Email: jbarbosas@ipn.mx

<sup>4</sup>LABINTHAP, ESIME Zacatenco, Instituto Politécnico Nacional, México. Email: oosoriod@ipn.mx

<sup>5</sup>Departamento de Energía, Unidad Azcapotzalco, Universidad Autónoma Metropolitana, México. Email: arthuro\_reyes@Yahoo.com.mx

## Resumen

En este trabajo se muestran los resultados experimentales de la dinámica del patrón de flujo anular aceite-agua y los gradientes de presión que se producen al conducirlo en una tubería vertical ascendente. Para el estudio, se diseñó, construyó y caracterizó una instalación experimental y una boquilla de inyección. Los fluidos seleccionados fueron aceite con una viscosidad de  $\mu = 97$  cP, con 21.47 API y agua con 10 API. Las mediciones se realizaron en un rango de velocidades superficiales de  $U_{SO} = 0.039$  a  $0.247$  m/s para el aceite y de  $U_{SW} = 0.080$  m/s para el agua. A partir de los resultados experimentales, se muestra el efecto de la boquilla para inducir el grupo de patrones del flujo anular y su respectivo gradiente de presión, el cual, alcanza su valor más bajo al conducir el aceite envuelto por una película anular de agua de forma estable. Los resultados numéricos mostraron que existe un ahorro energético notable, ya que la pérdida de presión por fricción es hasta 23 veces menor al conducir la misma cantidad de aceite, pero bajo el esquema del patrón de flujo anular.

**Palabras clave:** Instalación experimental, boquilla de inyección, flujo anular, gradiente de presión.

## Abstract

This paper presents the experimental results of the dynamics of the oil-water annular flow pattern and the pressure gradients produced when driving it in a vertical ascending pipeline. For the study, an experimental installation and an injection nozzle were designed, built and characterized. The selected fluids were oil with a viscosity of  $\mu = 97$  cP, with 21.47 API and water with 10 API. The measurements were made in a range of superficial velocities of  $U_{SO} = 0.039$  to  $0.247$  m/s for the oil and  $U_{SW} = 0.080$  m/s for the water. From the experimental results, the effect of the nozzle to induce the group of annular flow patterns and its respective pressure gradient is shown, which reaches its lowest value when driving the oil surrounded by an annular film of water in a stable manner. The numerical results showed that there is a significant energy saving, since the pressure loss due to friction is up to 23 times lower when driving the same amount of oil, but under the annular flow pattern scheme.

**Keywords:** Experimental set-up, injection nozzle, annular flow, pressure gradient

## 1. Introducción

La mayoría de las reservas mundiales de petróleo se encuentran en la categoría de petróleo superpesado, este tipo de petróleo se caracteriza por tener una viscosidad muy alta mayor a 1000 cP y gravedad específica API menor o igual a 10. Transportar este petróleo por tuberías es todo un reto debido a las caídas

de presión que se presentan durante su transporte, por lo que son necesarios equipos muy potentes de bombeo y una enorme demanda de energía, por lo que se han hecho pruebas utilizando diferentes técnicas para el transporte de este tipo de fluido como la adición de tensoactivos, diluyentes ligeros o el aumento de la temperatura del petróleo para modificar su viscosidad ya que pueden reducir este consumo de energía, pero

su eficacia está limitada por la complejidad reológica del fluido. Una alternativa a estas técnicas es la denominada flujo lubricado que utiliza una película de agua que rodea al núcleo de aceite, reduciendo de manera significativa la pérdida de presión y la potencia de bombeo [8].

Por otro lado, también es importante mencionar que los sistemas de flujo bifásicos se presentan de forma continua en diferentes industrias, por lo que es necesario su comprensión para el diseño, dimensionamiento de equipos de almacenamiento, sistemas de bombeo y transporte. Dentro de este tipo de sistemas se encuentran los flujos de líquido-líquido y de gas-líquido, los cuales son de gran interés de estudio debido a que se presentan en las diferentes actividades de la industria petrolera, principalmente en el transporte de hidrocarburos. En este tipo de flujos se analizan variables como los patrones de flujo, la retención del líquido (hold-up), fracciones de las fases y la caída de presión principalmente. La mayoría de los métodos utilizados para comprender estos fenómenos físicos son correlaciones empíricas, por lo que es necesario presentar estudios con información confiable y muy cercanos al comportamiento real del sistema.[1]

En el caso del flujo líquido-líquido en tuberías verticales conocido como flujo anular, se presenta en casos en donde los dos fluidos son fases líquidas inmiscibles y tienen viscosidades muy diferentes entre ellos. Este tipo de patrón de flujo anular ha sido ampliamente estudiado por su relevancia en la producción de petróleo pesado, porque se ha demostrado que es un método eficiente para la producción de este tipo de petróleo. Es importante mencionar que la extracción y transporte de petróleo con una viscosidad alta es difícil y costoso, porque se requiere de disolventes, calentamiento o una combinación de estos, para que se pueda transportar por tuberías [2].

En el flujo anular de estos sistemas de petróleo y agua, el aceite fluye en el centro del tubo y está rodeado por un anillo de agua (película anular de agua) logrando una lubricación del aceite lo que hace que disminuyan las pérdidas de energía debido a la fricción. Como el petróleo no se encuentra en contacto con las paredes de la tubería, el esfuerzo cortante entre la tubería y el flujo disminuyen sustancialmente, lo que se traduce en una potencia de bombeo mucho menor.

La mayoría de los estudios experimentales de flujo anular son en tuberías horizontales, pero son mucho menos los estudios realizados en tuberías verticales. Los parámetros medidos en estos trabajos son los siguientes: los patrones y mapas de flujo, el gradiente o la caída de presión y la fracción volumétrica de los fluidos o (hold-up). Estos parámetros son importantes

para cuantificar la ganancia energética del flujo del fluido y para el diseño de las tuberías en donde se transportarán flujos bifásicos o multifásicos, incluyendo equipos de separación, sistemas de bombeo entre otros equipos de extracción y transporte.[2]

Estos estudios tienen como objetivo proponer modelos mecánicos que permitan predecir las variables involucradas en este tipo de flujos bifásicos para diferentes condiciones de operación como: las velocidades de los fluidos, diámetros de las tuberías, viscosidades del aceite, entre otros parámetros. A continuación, se presentan algunos trabajos de flujos anulares bifásicos en tuberías verticales.

Brauner presentó un modelo para predecir la caída de presión y la fracción volumétrica para un flujo anular. En este trabajo se concluye que, si los dos fluidos tienen números de Reynolds menores a 2300, ambas fases presentan un flujo laminar, que la caída de presión es independiente de las densidades de los fluidos, en caso contrario si se presenta un flujo turbulento y la diferencia entre las densidades de los fluidos es muy amplia, la caída de presión es mucho mayor. [3]

Bai et al, presentaron un estudio experimental en una tubería vertical, ascendente y descendente, las variables estudiadas fueron los patrones de flujo, la fracción volumétrica y el gradiente de presión. Reportaron que la caída de presión en el flujo de solo aceite fue 200 veces mayor que cuando se presentaba el patrón de flujo anular, con la misma velocidad de aceite [4].

Bannwart por su parte obtuvo modelos para el cálculo de la fracción volumétrica y la caída de presión en flujos anulares en tuberías horizontales y verticales, los datos que obtuvo los comparó con datos experimentales, y observó que tuvieron una buena concordancia. Una de sus conclusiones es que la fuerza interfacial juega un papel importante en la formación del patrón anular, en tubos con diámetros menores a 5 cm [5].

Prada y Bannwart realizaron un modelo para la caída de presión en un flujo anular vertical ascendente. También obtuvieron resultados experimentales de su trabajo, encontraron una disminución de la caída de presión de hasta mil veces cuando se comparaba un flujo anular con un flujo monofásico de aceite. También hicieron un estudio experimental en un tubo vertical y horizontal de flujo de aceite pesado y agua, obtuvieron el mapa de flujo e identificaron los patrones de flujo en función de la velocidad de los fluidos [6].

Por su parte Rodríguez y Bannwart midieron la fracción volumétrica de aceite, velocidad, longitud y

amplitud de las ondas que se forman en la interface agua-aceite en un flujo anular vertical ascendente y presentaron un modelo para el cálculo de la fracción volumétrica de aceite. Concluyeron que para formar un flujo anular en una tubería vertical ascendente la velocidad del aceite era ligeramente mayor que la del agua [7].

Vuong et al. También realizaron experimentos de flujo anular en tuberías verticales y horizontales, se enfocaron en la relación que existe entre la viscosidad del aceite con el patrón de flujo y la fracción volumétrica del agua. Observaron que el patrón de flujo anular y la fracción volumétrica no varían sustancialmente con respecto a la viscosidad de los fluidos, pero el gradiente de presión por fricción aumenta proporcionalmente con un aumento de la viscosidad del aceite empleado [1].

Cavicchio et. al. Efectuaron un estudio experimental sobre los efectos de la viscosidad en los parámetros del flujo anular en una tubería vertical, analizaron la relación de deslizamiento entre las fases, la fracción volumétrica del aceite y el gradiente de presión. Estos autores encontraron que, para las velocidades experimentales, una disminución en la viscosidad no es causa de cambios importantes en el gradiente de presión total.

Coelho et al. presentan los patrones de flujo que se forman en tres secciones diferentes de un tubo vertical y las pérdidas energéticas en cada patrón de flujo. Estos autores afirman que usando la técnica de flujo anular se requiere menos energía para el transporte de petróleo comparada con si solo se transportara el petróleo sin la película anular agua.

Varios estudios han investigado los flujos de petróleo y agua en una tubería vertical ascendente, Mukherjee et al. y Flores et al. investigaron el gradiente de presión y la retención (hold-up). Luo et al. se concentraron en la pérdida de presión y la inversión de fase. Farrar y Bruun, Abduvayt y otros, estudiaron los regímenes y patrones de flujo. Liu et al., Rodríguez y Bannwart y Zhao et al. exploraron la estructura y las características locales del flujo interfacial. Además, Luo et al. realizaron estudios sobre la pérdida de presión y la inversión de fase, mientras que Nigmatulin et al. llevaron a cabo mediciones de los efectos gravimétricos [8].

Estudios recientes como el de Jingyu Xu et al. analizaron los gradientes de presión por fricción en una tubería vertical ascendente para mezclas de petróleo y agua. Encontraron altos valores de gradiente de presión (mayores a 2.5 kPa/m) cuando el petróleo era la fase dominante, pero carecían de resultados sobre la frecuencia de cada patrón de flujo. Mydlarz-Gabryk et

al. diseñaron un montaje experimental con una boquilla de inyección de geometría cónica, que inducía los patrones de flujo, pero no mostraron el efecto que produce la boquilla en los gradientes de presión.

De la misma forma, Bannwart et al. identificaron visualmente patrones de flujo, incluyendo arrastre de gotas de aceite en flujo anular, pero no proporcionaron información sobre los gradientes de presión o detalles de la boquilla. En general, hay poca información sobre los gradientes de presión que producen los patrones de flujo agua-aceite en una tubería vertical ascendente, lo que dificulta las evaluaciones hidrodinámicas detalladas [8]. Por esto la motivación de realizar este trabajo de investigación para obtener más información sobre este tipo de flujo de fluidos y como se relacionan con el transporte de petróleo en oleoductos.

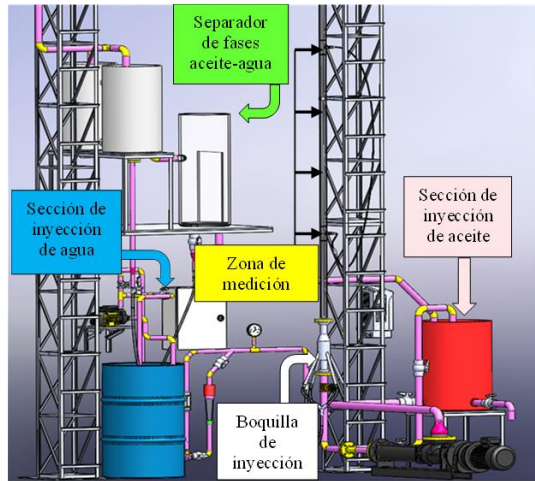
## 2. Metodología Experimental

Para obtener más información de la dinámica de flujos de mezclas aceite-agua, se diseñó, construyó y caracterizó una instalación experimental (Fig. 1) en el Laboratorio de Ingeniería Térmica e Hidráulica Aplicada (LABINTHAP) del Instituto Politécnico Nacional y se utiliza para estudiar las pérdidas de presión causadas en los patrones de flujo y el flujo anular aceite-agua en una tubería vertical ascendente. El diámetro de la tubería de estudio es de 0.038m (1.5 pg) de Policloruro de Vinilo color transparente. Los diámetros de la tubería para el aceite y el agua son de 0.038 m y 0.025 m (1 pg), respectivamente. Se diseñó una boquilla de inyección (mezclador) para inducir los fluidos en cuestión. Por otro lado, instrumentos de medición incluyen la medición del caudal de agua y aceite mediante rotámetros, placa de orificio y transmisores de presión. Las bombas utilizadas son de tornillo y centrifuga para mover el aceite y el agua respectivamente.

La metodología de la experimentación consiste en tomar un valor fijo de la velocidad superficial del aceite ( $U_{SO}$ ) que se encuentra ubicada en la matriz de pruebas y se hace variar la velocidad superficial del agua ( $U_{SW}$ ). La matriz de pruebas se puede leer en un ejemplo con la combinación de W1-O20 lo cual indica una velocidad mínima  $U_{SW} = 0.0219$  m/s combinada con la velocidad máxima  $U_{SO} = 0.3228$  m/s, inducidas en el sistema.

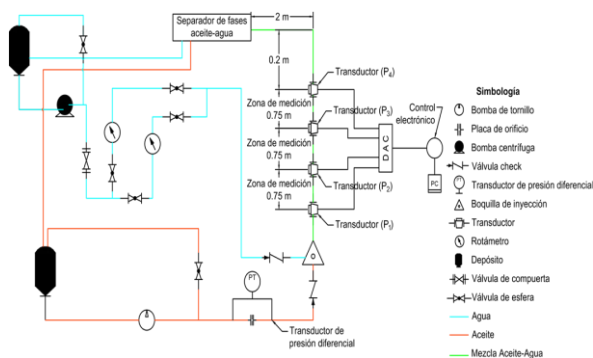
La técnica y el análisis para la medición serán desarrolladas utilizando el montaje experimental (Fig. 1), realizando la observación de los patrones de flujo y las frecuencias producidas por los gradientes de presión, estos obtenidos del grupo de transmisores de presión instalados en el montaje experimental. Además, se examinan las imágenes capturadas por medio de una cámara de alta velocidad (optical-zoom

a 120 fps), asimismo, se emplea el algoritmo de estudio para la predicción de la pérdida de presión del flujo anular e inestabilidad del mismo.



**Figura 1.** Vista general de la instalación experimental, diseñada en la plataforma solidWorks. Fuente: elaboración propia.

Por otro lado, el diseño de detalle y la teoría de operación de la instalación experimental se muestra en la figura 2.



**Figura 2.** Diseño de detalle de la instalación experimental y la teoría de operación de la forma de inyectar los fluidos aceite-agua. Fuente: elaboración propia.

En la figura 2 la operación de la instalación experimental y la conducción de los dos fluidos de trabajo aceite y agua está diferenciada por el color de la línea azul (agua) y naranja (aceite) respectivamente y la línea de color verde señala la mezcla aceite-agua en la zona de medición.

De acuerdo con el experimento, los dos fluidos se conducen por los rotámetros y manómetros hasta la boquilla de inyección, elemento mecánico en el cual el agua y el aceite interactúan físicamente induciendo artificialmente el patrón de flujo anular.

Por otro lado, las pruebas de estabilidad del sistema se realizaron con el objetivo de garantizar que el montaje experimental se encuentre en las condiciones óptimas para funcionar adecuadamente. Es decir, que permita la generación y las métricas del fenómeno que gobiernan los flujos bifásicos aceite-agua y principalmente el flujo lubricado.

Entre algunas verificaciones al sistema destacaron las pruebas de hermeticidad del sistema de la tubería de aceite y de agua, también se comprobó que los depósitos estacionarios que almacenan los fluidos de trabajo se mantuvieran libre de fugas.

Se realizaron también las pruebas de flujos volumétricos del aceite y del agua (Fig. 4) así como el buen funcionamiento de la boquilla de inyección diseñada y construida para inducir el patrón de flujo anular. Una vez superados los puntos anteriores, se llevaron a cabo pruebas preliminares y se realizaron sin los instrumentos de medición conectados. El propósito fue para demostrar que el fenómeno de un flujo anular puede ser reproducido y al mismo tiempo sensibilizarse en el procedimiento y operación del montaje experimental.

Por otro lado, para garantizar la estabilidad del flujo anular se diseñó y construyó una boquilla (Figura 3).



**Figura 3.** Vista general de la boquilla de inyección utilizada para inducir el patrón de flujo anular en un flujo ascendente aceite-agua en una tubería vertical. Fuente: elaboración propia.

Para el diseño se consideró el diámetro interno de la tubería de estudio ( $D_i = 38.1$  mm). La figura 3 muestra la vista general del diseño de la boquilla caracterizada por 4 confluencias de agua y una de aceite.

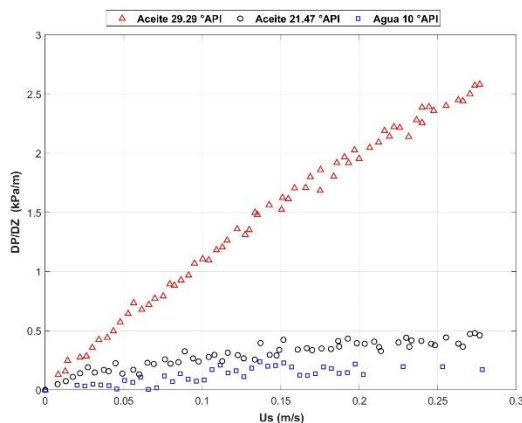
La boquilla de inyección está conformada de una configuración geométrica especial para inducir el patrón de flujo anular. Se conduce el aceite en la zona del núcleo y agua en la parte anular con el objetivo de envolver al núcleo central de aceite con la formación de una película de agua lubricante.

En el principio del experimento se efectuaron las mediciones de los flujos homogéneos, i.e., se midieron las pérdidas de presión por fricción de los flujos en una sola fase: agua y aceite de 29.29 y 21.47 API, los cuales tienen una viscosidad dinámica de  $\mu=506$  cP y  $\mu=97$  cP respectivamente y se mencionarán los resultados en lo subsecuente del artículo.

### 3. Resultados

Con la finalidad de garantizar el buen funcionamiento de la instalación experimental y la trazabilidad de las mediciones, se realizaron experimentos de pérdidas de presión por fricción de los fluidos en su forma monofásica, i.e., se condujo agua y aceite sin mezclarlos, a continuación, se presentan los resultados obtenidos.

En la figura 4 se representan gráficamente los gradientes de presión por fricción que se produce al conducir los aceite de 21.47 API y de 29.29 API con 97 cP y 506 cP y agua respectivamente en la tubería vertical ascendente.



**Figura 4.** Pérdida de presión por fricción al conducir un flujo monofásico de 27.47 API con  $\mu_o = 97$  cP, aceite de 29.29 API con  $\mu_o = 506$  cP y agua 10 API (1 cP). Fuente: elaboración propia.

En la Figura 4 se observa el comportamiento de los gradientes de presión por fricción que se producen en la tubería vertical ascendente la cual tiene una longitud total de 59 diámetros. También se utilizaron dos tipos de aceite con características físicas diferentes para este análisis.

Se observó que la pérdida de presión debido a la fricción al conducir el aceite de 29.29 API fue por lo menos 24 veces más que la que se obtuvo al conducir el flujo de agua, cuando se condujeron los fluidos en forma individual.

De igual forma, al conducir el aceite de 21.47 API la pérdida de presión por fricción fue al menos de 4 veces en comparación con el flujo de agua. Todos los fluidos conducidos a temperatura ambiente.

Estos valores producen un diferencial viscoso de más de 500 veces del aceite de 29.29 API con respecto al agua y 90 veces del aceite de 21.47 API en referencia también con el agua 10 API.

Por lo que la magnitud de la energía que se pierde en forma de fricción es ocasionada por el alto factor de deslizamiento que se produce en la zona interfacial de la pared interna de la tubería, zona en donde la condición de la velocidad del flujo es igual a cero.

En esta circunstancia, la pérdida de presión por fricción se origina principalmente por la diferencia de las viscosidades de los aceites en cuestión y es en menos relevancia por la diferencia de los grados API, i.e., los aceites estudiados tienen un peso API menor en comparación con la del agua que es de 10 API, por lo que se pueden catalogar como aceites más ligeros comparados con agua y requeriría más energía para ser movida.

El análisis anterior se presenta como un punto de referencia para realizar una comparación de las pérdidas de presión por fricción al conducir la misma cantidad de aceite, pero bajo el esquema del flujo anular y de esta manera medir la ganancia energética a lo largo de la tubería de experimentación.

Por el motivo anterior, en este trabajo presentamos los resultados del patrón de flujo anular aceite-agua en una tubería vertical ascendente utilizando una boquilla y el aceite de 21.4 API con 97 cP. De la misma forma, la tabla 1 corresponde a la nomenclatura y a las condiciones de las velocidades superficiales del aceite y del agua utilizadas en la matriz de pruebas.

**Tabla 1.** Nomenclatura de los parámetros del flujo anular con el aceite de 21.47 API

Nomenclatura experimental	Velocidad superficial [m/s]
O5-W13	$U_{so} = 0.040$ y $U_{sw} = 0.080$
O10-W13	$U_{so} = 0.065$ y $U_{sw} = 0.080$
O22-W13	$U_{so} = 0.122$ y $U_{sw} = 0.080$
O44-W13	$U_{so} = 0.229$ y $U_{sw} = 0.080$
O55-W13	$U_{so} = 0.276$ y $U_{sw} = 0.080$

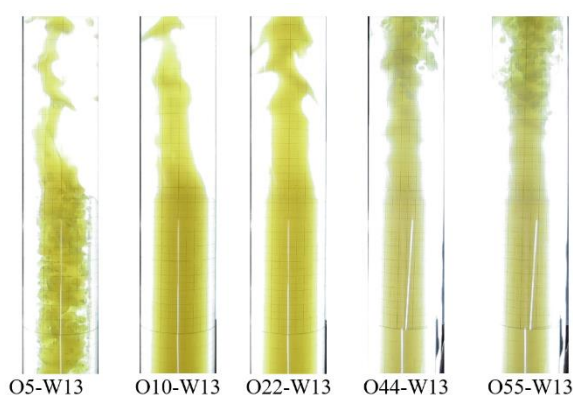
Fuente: elaboración propia.



En el mismo contexto, la figura 5 muestra las fotografías obtenidas de los experimentos realizados en ellas se observa la zona de inyección del núcleo de aceite en color amarillo y la película anular de agua en color transparente (blanco).

Las condiciones de flujo del aceite fueron de O5 a O55 y para el agua se posicionó la condición de W13.

Se observó un grupo amplio de flujos de aceite-agua inducidos con la boquilla, los cuales siguen la tendencia de generar ondulaciones a bajas velocidades del aceite. Del estudio se pudo determinar que el tamaño de las crestas y los valles en la zona interfacial aceite-agua son relativamente grandes, además, que la longitud de estas ondas no es simétrica.

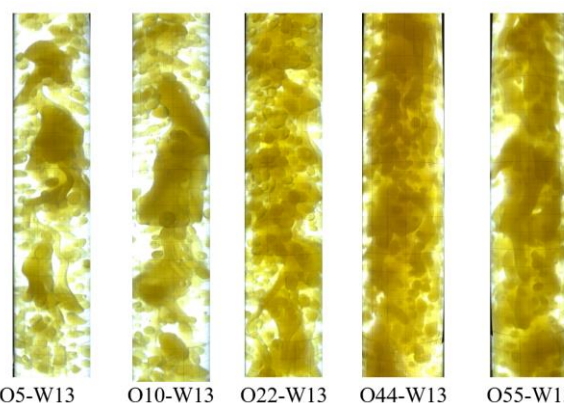


**Figura 5.** Fotos de la boquilla de inyección, con diferentes condiciones de flujo. El aceite empleado fue el 21.47 API y  $\mu_o = 97$  cP, el núcleo de aceite se muestra en color amarillo y la película anular de agua en color transparente (blanco). Fuente: elaboración propia.

La dinámica estructural de este grupo de flujos aceite en agua (o/w) hace referencia a fenómenos interfaciales generados en el núcleo, es decir, se puede suponer una fuerza de elongación en el núcleo y en una dirección paralela al sentido de flujo ya que se producen ondulaciones interfaciales grandes de mayor frecuencia de los fluidos en especial en el núcleo de aceite.

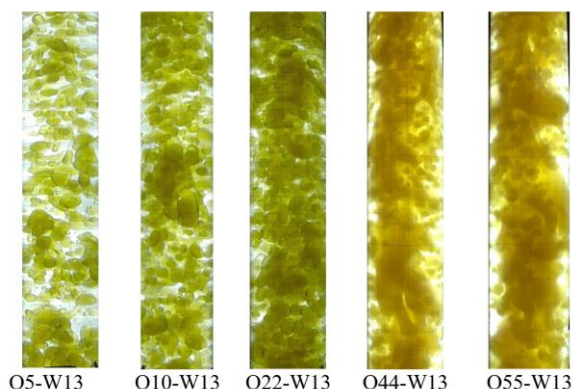
Por otro lado, en las condiciones de flujo de O44-W13 y O55-W13 se obtuvieron las siguientes observaciones en la figura 6. Según el experimento realizado al aumentar las velocidades de las fases se estabiliza la interface del núcleo de aceite, actuando como un tensor unidireccional, condición que mantiene estable y le da forma al núcleo de aceite.

Las fotos mostradas en la figura 6 se obtuvieron con una cámara de alta velocidad y a una distancia  $< 20$  diámetros después del inyector.



**Figura 6.** Flujo anular en estado transitorio. El aceite empleado fue de 21.47 API y  $\mu_o = 97$  cP, el núcleo de aceite se muestra en color amarillo y la película anular de agua en color transparente (blanco). Fuente: elaboración propia.

En la figura 7 se muestran los patrones de flujo aceite-agua que se produjeron en las condiciones hidrodinámicas mostradas en la tabla 1. Las fotografías fueron tomadas a una distancia  $> 39$  diámetros después de la boquilla de inyección, i.e., en la sección de la salida de la tubería vertical.



**Figura 7.** Fotos del estado transitorio del flujo anular encontrado inducido con la boquilla. El aceite empleado fue el 21.47 API y  $\mu_o = 97$  cP, el núcleo de aceite se muestra en color amarillo y la película anular de agua en color transparente (blanco). La zona de estudio corresponde a la salida de la tubería vertical. Fuente: elaboración propia.

Se puede observar en la figura 7, sección de salida de la tubería, que al aumentar de manera gradual la velocidad superficial del aceite y manteniendo estable la velocidad del agua se puede encontrar un parámetro hidrodinámico en el cual se desarrolla el patrón de flujo anular catalogado como una zona de transición al patrón de flujo anular.

En la figura 7 se observó la generación de gotas de aceite perturbando la zona anular (película de agua), por lo que la película de agua no es estable en las

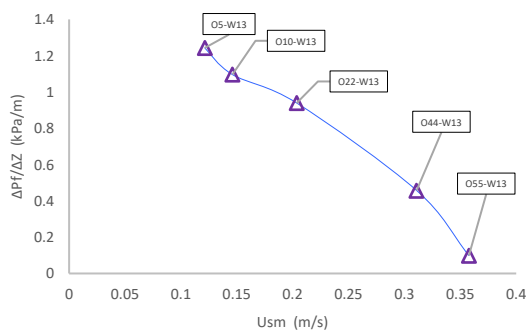
primeras tres condiciones del flujo de aceite (O5, O10 y O22).

Por otro lado, en la condición de flujo O55-W13 se puede observar la formación del flujo anular, sin embargo, este patrón de flujo desarrolló el fenómeno de arrastre de pequeñas gotas de aceite en agua, perturbando la interface aceite-agua (“olas de bambú”) y de esta forma la película anular de agua se contamina de aceite.

Sin embargo, con las condiciones de flujo señaladas, el gradiente de presión por fricción se posiciona en un valor numérico bajo  $< 0.2$  kPa/m (Figura 8) en comparación con los otros patrones de flujo semi-anulares (transiciones de flujo) encontrados, pues el anillo de agua provoca la lubricación del transporte de aceite a través de la tubería.

De todo lo anterior se observó que la estabilidad del núcleo de aceite se presenta a partir de la condición O44 y O55 y el tamaño de la cresta de las ondas interfaciales disminuyen de forma notable, pero el período de las ondas se incrementa.

Esto produce que en ciertas secciones de la interface los períodos de las ondas interfaciales del núcleo de aceite interactúen directamente con la tubería interna de la tubería vertical, lo que podría sumar temporalmente pérdidas de presión por fricción de forma local.

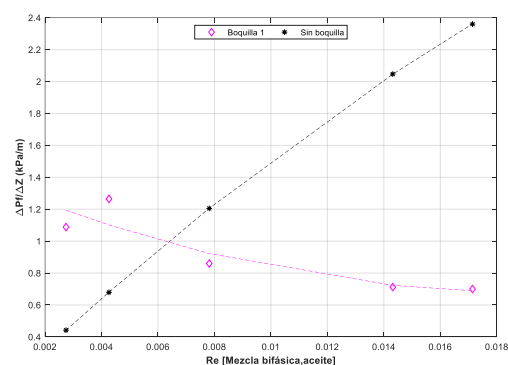


**Figura 8.** Gradiente de presión por fricción de la condición del flujo anular. Se utilizó la boquilla de inyección con el aceite de 21.47 API y una viscosidad de  $\mu_o = 97$  cP. Las condiciones de la mezcla aceite-agua fueron de  $U_{so} = 0.040$  a  $0.276$  m/s y  $U_{sw} = 0.080$  m/s. Fuente: elaboración propia.

En la figura 8 se modela el comportamiento del gradiente de presión por fricción que se produjo al conducir la mezcla aceite-agua inducida mediante la boquilla al patrón de flujo anular. Se pudo determinar mediante las observaciones que para las primeras condiciones de la mezcla (O5, O10 y O22) el gradiente de presión se posiciona en valores numéricos altos de

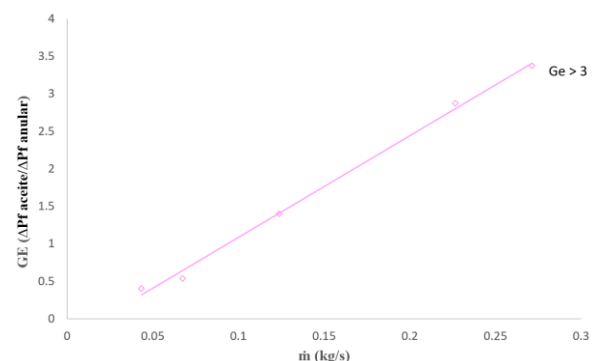
orden de 1.4 kPa/m, sin embargo, con forme se incorpora mas aceite al sistema se alcanza un parámetro de transición al flujo anular, para después posicionarse en un valor numérico bajo, i.e., de 0.1 kPa/m condición catalogada como la zona del flujo anular.

Por otra parte, la figura 9 muestra la tendencia del gradiente de presión por fricción al conducir el aceite de 21.47 API en una fase y por otro inducido al flujo anular o flujo lubricado, i.e., es una comparativa numérica de los gradientes de presión por fricción producidos en la conducción de la tubería vertical.



**Figura 9.** Gradiente de presión por fricción de los flujos anulares inducidos con la boquilla. Se utilizó el aceite de 21.47API y 97 cP para el aceite se ajustaron las siguientes condiciones  $U_{so} = 0.039$  m/s a  $U_{so} = 0.247$  m/s y se mantuvo fija la velocidad superficial del agua en  $U_{sw} = 0.080$  m/s. Fuente: elaboración propia.

Se observa en la figura 9 que la pérdida de presión por fricción es de 16 veces mayor cuando se conduce el aceite en una fase en comparación a cuando se induce al patrón de flujo anular y en la figura 10 se muestra la ganancia energética.

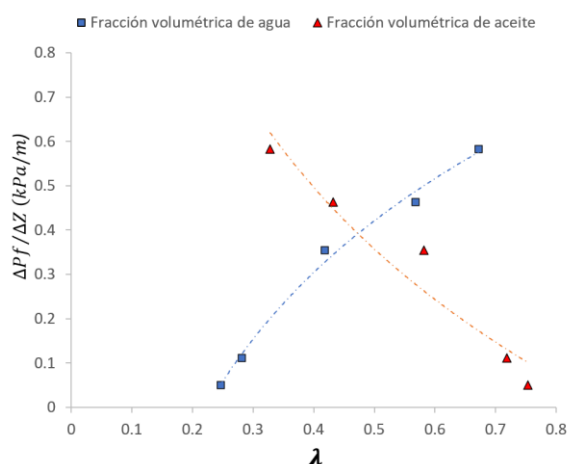


**Figura 10.** Ganancia Energética (GE) del patrón de flujo anular aceite-agua encontrado experimentalmente con el aceite de 21.47 API y 97 cP. Los flujos másicos del aceite se posicionaron en un rango de  $\dot{m}_0 = 0.043$  a  $0.271$  kg/s. Fuente: elaboración propia.

El ahorro o ganancia energética que se puede obtener con esta técnica de flujo lubricado e implementado la boquilla de inyección demuestra la baja pérdida de presión por fricción cuando se conduce el aceite bajo la tecnología de flujo lubricado posicionándose en un valor  $Ge > 3$ .

De esta forma se describe la ganancia energética como la relación del cociente del gradiente de presión por fricción del flujo monofásico de aceite y por otro lado el gradiente de presión por fricción del flujo anular medido.

Por otra parte, la figura 11, muestra la variación de la fracción volumétrica de las fases en cuestión cuando se conduce la mezcla bifásica bajo el esquema del flujo anular.



**Figura 11.** Fracción volumétrica del patrón de flujo anular aceite-agua encontrado experimentalmente con el aceite de 21.47 API y 97 cP. Fuente: elaboración propia.

La fracción volumétrica = Vol. ocupado por alguna de las fases en el vol. Control, i.e.,  $\lambda_w + \lambda_o = 1$ . La variación de la fracción volumétrica superficial de determinó considerando a la mezcla bifásica aceite-agua como un pseudo fluido monofásico ponderando las propiedades de los fluidos en cuestión y sumando las aportaciones volumétricas de cada fase.

Experimentalmente el flujo anular generó como la fase dominante el aceite y la fase dispersa la ocupó la película anular de agua, i.e., se puede identificar un flujo anular con una velocidad superficial del núcleo de aceite mayor que la velocidad superficial de la película anular de agua, por lo que se puede proponer un perfil de velocidad en el que el aceite se desplaza a mayor velocidad sobre la película anular de agua.

#### 4. Conclusiones

En este trabajo se realizó un estudio experimental de las pérdidas de presión que se producen al conducir un patrón de flujo anular aceite-agua en una tubería vertical ascendente, para ello, se diseñó, construyó y caracterizó una instalación experimental y una boquilla de inyección. Los fluidos de trabajo fueron dos tipos de aceite; aceite 29.29 API con  $\mu_o = 506$  cP, aceite 21.47 API con  $\mu_o = 97$  cP y agua de 10API con  $\mu_w = 1$  cP.

Los experimentos se realizaron en condiciones atmosféricas y adiabáticas locales. Las condiciones de flujo fueron de  $U_{so} = 0.247$  m/s ( $\dot{m}_o = 0.271$  kg/s), se pudo constatar que la pérdida de presión debido a la fricción en el aceite se redujo hasta 23 veces evidentemente cuando se inyecta un flujo de agua en forma de película anular a razón de  $U_{sw} = 8.77 \times 10^{-2}$  m/s ( $\dot{m}_w = 0.108$  kg/s)

La inyección de una película anular de agua a una velocidad específica reduce significativamente la pérdida de presión en el flujo de aceite, lo que produce un ahorro energético notable, por lo que la medición de la Ganancia Energética fue de  $GE > 3$  garantizándose así la función del patrón de flujo anular.

Por último, se establece que la pérdida de presión por fricción del aceite es 3 veces mayor con el aceite de 21.47 API con  $\mu_o = 97$  cP respecto al flujo de agua 10 API con  $\mu_w = 1$  cP, todos los fluidos conducidos de forma individual. Por lo que se concluye que la pérdida de presión se origina en gran parte por la magnitud de la viscosidad de los aceites y tienen poca relevancia con la diferencia de los grados API.

#### 5. Referencias

- [1] Reyes González, D. V. (2017). Modelamiento en CFD de flujo bifásico (aceite-gas) anular descendente en tuberías verticales.
- [2] Soria, A. B., Peña, H. F. V., & Ruiz, I. D. (2021). Comparación cualitativa de estimaciones de la fracción volumétrica de aceite en flujo anular aceite-agua Core-Flow. In Desarrollo e Innovación en Ingeniería (pp. 654-664). Instituto Antioqueño de Investigación (IAI).
- [3] N. Brauner, "Two-phase liquid-liquid anular flow," Int. J. Multiph. Flow, vol. 17, no. 1, pp. 59–76, 1991.
- [4] R. Bai, K. Chen, and D. D. Joseph, "Lubricated Pipelining: Stability of Core-Annular Flow V: Experiments and comparison with theory," J. fluid mech, pp. 97–132, 1992.



- [5] A. C. Bannwart, "Modeling aspects of oil – water core – annular flows," J. Pet. Sci. Eng., vol. 32, pp. 127–143, 2001
- [6] J. W. V. Prada and A. C. Bannwart, "Modeling of Vertical Core-Annular Flows and Application to Heavy Oil Production," J. Energy Resour. Technol., vol. 123, no. 3, pp. 194–199, Sep. 2001.
- [7] O. M. H. Rodriguez and A. C. Bannwart, "Experimental study on interfacial waves in vertical core flow," J. Pet. Sci. Eng., vol. 54, no. 3–4, pp. 140–148, 2006.
- [8] Sierra-Sánchez, I., Sánchez-Silva, F., Carvajal-Mariscal, I., Toledo-García, M. (2024). 'Experimental study of flow patterns and pressure losses in vertical flows-of-oil-water-mixtures'. DOI: <https://doi.org/10.6036/10839>.
- [9] A. Kamel, O. Alomair, and A. Elsharkawy, 'SPE-184140-MS 'Compositional Based Heavy Oil Viscosity Model for Kuwaiti Heavy Crude Oils', 2016.
- [10] D. D. Joseph, R. Bai, K. P. Chen, and Y. Y. Renardy, 'Core-Annular Flows', 1997. Available: [www.annualreviews.org](http://www.annualreviews.org).
- [11] S. Ghosh, T. K. Mandal, G. Das, and P. K. Das, 'Review of Oil Water Core Annular Flow', Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 13, no. 8. Oct. 2009. doi: 10.1016/j.rser.2008.09.034.
- [12] D. D. Joseph, R. Bai, K. P. Chen, and Y. Y. Renardy, 'Core-Annular Flows', vol. 33., 1997.
- [13] P. L. Spedding, G. S. Woods, R. S. Raghunathan, and J. K. Watterson, 'Flow pattern, holdup and pressure drop in vertical and near vertical two- and three-phase upflow', Chemical Engineering Research and Design, vol. 78, no. 3, pp. 404–418, 2000, doi: 10.1205/026387600527301.
- [14] H. Laurencio Alfonso and Y. Delgado Drubey, 'Reological Properties Of Emulsions Of Petroleum Weighed In Water', 2008.
- [15] M. Ishii and T. Hibiki, Thermo-fluid dynamics of two-phase flow (Second edition). Springer New York, 2011. doi: 10.1007/978-1-4419-7985-8.
- [16] E. Burlutskiy and C. K. Turangan, 'A computational fluid dynamics study on oil-in-water dispersion in vertical pipe flows', Chemical Engineering Research and Design, vol. 93, pp. 48–54, Jan. 2015, doi: 10.1016/j.cherd.2014.05.020.
- [17] D. H. Vuong, H.-Q. Zhang, C. Sarica, and M. Li, 'SPE 124542 Experimental Study on High Viscosity Oil/Water Flow in Horizontal and Vertical Pipes', 2009.
- [18] F. Zavareh, A. D. Hill, and A. L. Podia, 'SPE Flow Regimes in Vertical and Inclined Oil/Water Flow in Pipes II', 1988.
- [19] M. E. Charles, G. W. Govier3, and G. W. Hodgson, 'The Horizontal Pipeline Flow of Equal Density Oil. Water Mixtures'' Vol. 3, 2016.
- [20] G. P. Lucas and N. Panagiotopoulos, 'Oil volume fraction and velocity profiles in vertical, bubbly oil-in-water flows', Flow Measurement and Instrumentation, vol.20, no. 3, pp. 127–135, Jun. 2009, doi: 10.1016/j.flowmeasinst.2009.02.005.