

Estudio experimental del gradiente de presión y la ganancia energética de un flujo anular aceite-agua al conducirlo en una tubería vertical ascendente

Irving Néstor Sierra Sánchez¹, Juan Gabriel Barbosa Saldaña², Florencio Sánchez Silva², Ascensión Romero Martínez³, Arturo Reyes León⁴, Oscar José Pineda¹ y Oscar Virgilio Osorio Díaz¹

¹ ESIME-Culhuacán Instituto Politécnico Nacional, Laboratorio de Ingeniería Térmica. Av. Sta. Ana #1 000, Col. San Francisco Culhuacán, Alcaldía Coyoacán, C.P. 04440, CDMX. México, isierras@ipn.mx

² ESIME-Zacatenco Instituto Politécnico Nacional, LABINTHAP. Av. IPN s/n, Col. Lindavista, Alcaldía Gustavo A. Madero, C.P. 07738, CDMX. México, jbarbosas@ipn.mx

³ Instituto Mexicano del Petróleo, Dirección de Investigación en Exploración y Producción. Eje Central Lázaro Cárdenas #152, Sn. Bartolo Atepehuacan, Alcaldía Gustavo A. Madero, C.P. 07730, CDMX. México, aromero@imp.mx

⁴ Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Azcapotzalco, Departamento de Energía. Av. San Pablo #420, Col. Nueva el Rosario, Alcaldía Azcapotzalco, C.P. 02128, CDMX. México, arrela@azc.uam.mx

Resumen

En este trabajo se presenta un estudio experimental del flujo anular aceite-agua utilizando la técnica de flujo lubricado en el transporte de aceite pesado por tuberías en la industria petrolera. La conducción bifásica de estas mezclas ha presentado problemas como la pérdida de presión, inestabilidad de flujo y caracterización geométrica del núcleo-anulo. En el mismo contexto, la literatura ofrece información limitada acerca de estos tópicos y no define una correlación con cada uno de ellos. El alcance del trabajo se centra en estudiar los gradientes de presión por fricción en una tubería vertical ascendente con un diámetro de $d = 0.040\text{ m}$ y una longitud $l = 57\text{ d}$. El estudio contempla el ahorro energético en la conducción del flujo anular e investigar la influencia de la geometría en la boquilla de inyección. Se probaron cuatro boquillas, las cuales tienen diferentes métricas radiales del núcleo de aceite y de la película anular de agua. Los fluidos utilizados fueron aceite de 21.47 y 29.29 API y agua. La experimentación se realizó empleando las boquillas y de acuerdo con una matriz de pruebas que tiene como parámetros la velocidad superficial del aceite ($U_{so} = 0\text{ a }0.257\text{ m/s}$) y la velocidad superficial del agua ($U_{sw} = 0\text{ a }0.780\text{ m/s}$), por lo que se tomó un valor fijo de la U_{sw} y se hizo variar la U_{so} , y en cada caso se observó y caracterizaron los patrones de flujo. Los resultados se analizaron con un modelo de regresión lineal simple, y se obtuvo un método práctico para la predicción de la pérdida de presión y la ganancia energética, ya que el gradiente de presión disminuye hasta 23 veces al conducir el aceite a una velocidad másica de $G > 200\text{ kg/m}^2\text{ s}$ con 0.29 kg/s bajo el esquema de flujo anular empleando una boquilla en particular.

Palabras clave— Ahorro energético, Gradiente de presión, Instalación experimental, Patrones de flujo.

Experimental study of the pressure gradient and energy gain of an annular oil-water flow when conducted in an ascending vertical pipe

Abstract

This paper presents an experimental study of annular oil-water flow using the lubricated flow technique for transporting heavy oil through pipelines in the petroleum industry. The two-phase conveyance of these mixtures has presented challenges such as pressure loss, flow instability, and geometric characterization of the core-annulus. In this same context, literature offers limited information on these topics and does not define a correlation with each of them. The scope of this work focuses on studying frictional pressure gradients in a vertically rising pipe with a diameter $d = 0.040\text{ m}$ and length $l = 57\text{ d}$. The study considers energy savings in the conduction of the annular flow and investigates the influence of the geometry in the injection nozzle. Four nozzles were tested, each with different radial metrics for the oil core and the annular water film. The fluids used were 21.47 and 29.29 API oil and water. The experiment was conducted using the nozzles and according to a test matrix with parameters for the superficial oil velocity ($U_{so} = 0\text{ to }0.257\text{ m/s}$) and the superficial water velocity ($U_{sw} = 0\text{ to }0.780\text{ m/s}$). A fixed value for U_{sw} was used, and the U_{so} was varied, and in each case the flow patterns were observed and characterized. The results were analyzed with a simple linear regression model, and a practical method for predicting pressure loss and energy gain was obtained, since the pressure gradient decreases up to 23 times when driving the oil at a mass flux density $G > 200\text{ kg/m}^2\text{ s}$ with 0.29 kg/s under the annular flow scheme using a particular nozzle.

Keywords— Energy saving, Pressure gradient, Experimental installation, Flow patterns.

I. INTRODUCCIÓN

Cuando fluyen juntas dos de las tres fases en las que se puede encontrar una sustancia, se tiene una mezcla; sólido-líquido, líquido-gas, gas-partículas sólidas. Bajo esta definición también se pueden incluir, flujos bifásicos a un componente, por ejemplo; agua-vapor, agua-hielo, y flujos bifásicos a dos componentes o a multi-componentes, por ejemplo, agua-aceite, gas-aceite y gas-agua-aceite-sólidos.

En las actividades productivas el flujo bifásico gas-líquido o líquido-líquido puede aparecer en industrias como la petrolera; Instituto Americano del Petróleo (API), la química, nucleares, geotérmica, espacial, de alimentos, cosméticos, farmacéutica, etc. El flujo bifásico aceite-agua ocurre generalmente en la industria petrolera durante los procesos de producción y del transporte de petróleo (aceite) por medio de tuberías que pueden ser, horizontales, inclinadas o verticales [1].

Alrededor de dos tercios de las reservas mundiales de petróleo pertenecen a la categoría de petróleo pesado, caracterizado por su alta viscosidad ($\mu = 1,000$ cP) y baja gravedad API ≤ 10 . Transportar este tipo de petróleo por oleoductos es complejo debido a la importante pérdida de presión, que requiere equipos potentes y una enorme demanda de energía. Técnicas como la adición de tensioactivos, diluyentes ligeros o el aumento de la temperatura del petróleo pueden reducir el consumo de energía, pero su eficacia se ve limitada por la complejidad reológica del fluido y por las condiciones térmicas de frontera en su conducción [2]-[5].

Como alternativa, una técnica denominada flujo lubricado utiliza una película de agua que rodea el núcleo de aceite, reduciendo significativamente la pérdida de presión y la potencia de bombeo favoreciendo el ahorro energético [6], [7].

Sin embargo, existen factores geométricos y reológicos que gobiernan la estabilidad interfacial en un flujo bifásico anular. Estos factores son la tensión superficial de los fluidos, fricción en la interfase aceite-agua, geometría de la boquilla, la viscosidad y las fuerzas de flotación en el núcleo de aceite, entre otras [8]-[10].

El estudio realizado por [11]. Describen experimentalmente la morfología estructural del núcleo de aceite debido a los fluxes volumétricos de la mezcla que se le imponen al sistema. Las propiedades del aceite fueron: $\rho_o = 925.5$ kg/m³ (21.3 API), $\mu_o = 488$ cP, el diámetro de la tubería 104 mm. Los autores no proporcionan la longitud de la tubería de experimentación. Con las observaciones experimentales del patrón de flujo anular describen la dinámica y la estructura del núcleo de aceite realizando una clasificación de las ondas generadas en la interfase del núcleo y la película anular [12].

En otros experimentos, se establece que una contribución para generar gradientes de presión menores a 1 kPa/m en la fracción local y distribución espacial de la película de agua en el anulo, debe ser continua y estable para mantener el núcleo de aceite amortiguado en la interfase y evitar que entre en contacto con la pared interna de la tubería de transporte [13].

Por otro lado, cuando los fluxes volumétricos de las fases se

modifican y, si el aceite cambia de grados API puede ser más ligero o pesado que el agua, por lo que los efectos de flotabilidad contribuyen a la separación espontánea de las fases y los perfiles de velocidad modifican la velocidad del núcleo de aceite, ya sea para ser jalado por la película de agua o bien para desplazarse con más velocidad a través de ella. Los autores desestiman en efecto geométrico de la boquilla [14], [15].

En otra investigación desarrollada por [16], [17] reportan que de los distintos perfiles de flujo dependen de las características reológicas de los fluidos en cuestión, principalmente del aceite debido a su gravedad específica con respecto al agua, afectados por las fuerzas de flotabilidad, así como por su viscosidad que es el factor responsable de las fuerzas de corte interfacial y estabilidad del patrón de flujo anular.

Se han llevado a cabo estudios de laboratorio utilizando tubos verticales de diámetro pequeño $d = 20$ y 38 mm y reportan los siguientes resultados. La pérdida de presión en el flujo anular se ve afectada con el aumento de la viscosidad, resultante de una emulsificación de la mezcla de aceite y agua generando un gradiente de presión del orden de hasta 3 kPa/m. Los investigadores no proporcionan más datos al respecto [18]-[20].

También se han realizado estudios teóricos para establecer criterios físicos de pérdida de presión y del ahorro energético como en [21]-[23]. Las condiciones de la mezcla fueron de $U_{sw} = 0.1$ a 0.5 m/s y $U_{so} = 0.045$ a 1.27 m/s y aceite de 34.9 API. Utilizaron la teoría de la estabilidad hidrodinámica concluyendo que para mantener un flujo anular en estado estable las densidades de los fluidos adyacentes podrían ser equivalentes siempre y cuando el fluido con mayor viscosidad se ubique en el núcleo, ocupando el volumen mayor de la sección transversal de la tubería de conducción.

En otras investigaciones la posición e inclinación de la tubería y dirección del flujo son algunos parámetros principales para definir el modelo de la interfase del núcleo y la pérdida de presión de los diversos flujos anulares, así como la transición de ellos [24]-[27]. Sin embargo, los reportes sobre el efecto de la boquilla y su relación con la pérdida de presión son escasos.

Este trabajo se enfoca en caracterizar experimentalmente el patrón de flujo anular aceite-agua en una tubería vertical ascendente inducido por un grupo de cuatro boquillas y dos tipos de aceite con características diferentes.

II. ALCANCE DEL EXPERIMENTO

El alcance experimental contempla tres campos principales que componen al flujo anular, el efecto de las boquillas de inyección, el gradiente de presión y la ganancia energética del sistema de conducción de la mezcla bifásica empleando la técnica de flujo lubricado. El aparato experimental se encuentra ubicado en el LABINTHAP del Instituto Politécnico Nacional.

A. Instalación Experimental

La configuración del aparato experimental se muestra en la Fig. 1. El diámetro de la tubería es de $d = 0.040$ m color transparente de Policloruro de Vinilo, cedula 40 y una altura total de 3.5 m. Está caracterizada para operar en dirección de flujo ascendente con las condiciones presentadas en la Tabla I.

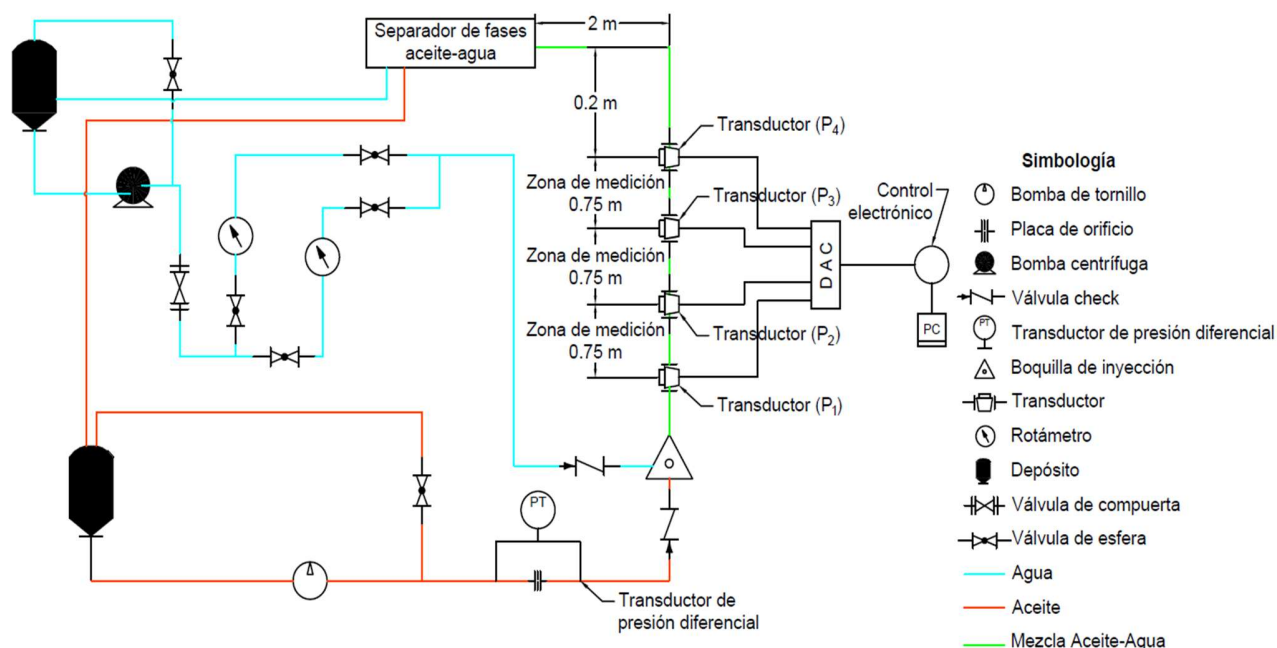


Fig. 1. Vista esquemática del aparato experimental para el estudio del flujo aceite-agua.

El criterio de selección del aceite se fundamenta en una secuencia de eventos comparativos de pérdida de presión en sistemas bifásicos, i.e., conducir un aceite pesado con baja viscosidad y, por otro lado, un aceite ligero con alta viscosidad. Los fluidos de trabajo fueron: en flujo anular el aceite 29.29 API, $\rho_0 = 880 \text{ kg/m}^3$, $\mu_0 = 506 \text{ cP}$, y en flujo monofásico el aceite 21.47 API con $\rho_0 = 925 \text{ kg/m}^3$, $\mu_0 = 97 \text{ cP}$ y agua, considerados como flujo isotérmico e incompresible.

Los flujos volumétricos se midieron utilizando rotámetros en circuitos separados del agua y del aceite. Para producir el drenado del aire del interior del sistema, se inyecta el agua como primer fluido y se abren las válvulas de venteo conectadas con cada transductor de presión, esto también provoca la humectación en las paredes internas de la tubería para posteriormente inyectar el aceite y disminuir el efecto de la adherencia. Finalmente, se ajustan los fluxes volumétricos en los rotámetros para mantener estable el experimento.

TABLA I
CONDICIONES DE FUNCIONAMIENTO DEL MONTAJE EXPERIMENTAL

Fluido	Velocidad superficial U_{Si} (m/s)	Velocidad másica G (kg/m ² s)	Fracción de vol. superficial β_i (-)
Agua	0.020 - 0.708	7.29 - 217.7	-
29.29 API aceite	0.008 - 0.247	20.247 - 708.673	0.256 - 0.782
21.47 API aceite	0.007 - 0.276	589.613 - 613.670	0.278 - 0.473

Se utilizaron dos bombas para mover los fluidos desde los depósitos de succión hasta la boquilla de inyección. Una bomba centrífuga para el agua proporciona un rango de operación de 0 a 80 l/m. Y una bomba de tornillo para el aceite suministra el

flujo volumétrico al sistema a razón de 0 a 20 l/min.

La zona de medición se conforma de 57 diámetros, i.e., 2.25 m de longitud. Se instalaron cuatro transductores de presión utilizados para medir la presión en dirección axial en la tubería.

El rango de operación de los transductores de presión equivale a 0 - 0.137 MPa con una precisión de 0.6 a 1.3%.

La señal emitida por los transductores de presión es enviada a un módulo de control donde por medio de un algoritmo programado en el software LabVIEW se visualizan los valores de las mediciones en tiempo real.

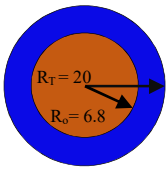
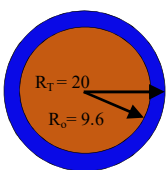
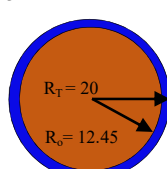
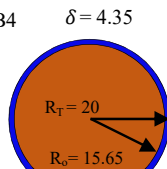
El registro visual de los patrones de flujo se realizó con tres cámaras de video. Dos cámaras tomaron fotografías a una velocidad de obturación de 1/1600 s mientras que la cámara de video grabó películas en alta velocidad a 120 FPS.

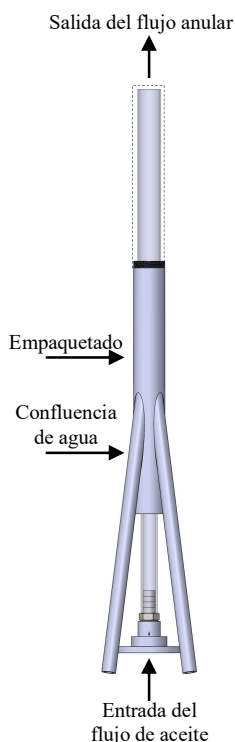
El diseño del experimento sugiere un separador de fases para recolectar la mezcla. En donde por medio del método de decantación gravitacional se separa el aceite del agua y ambos fluidos se recuperan para ser devueltos a los depósitos. La metodología aplicada ofrece la posibilidad de realizar observaciones continuas de los patrones de flujo y mediciones simultáneas de la caída de presión.

B. Boquilla de inyección

Para inducir el patrón de flujo anular se diseñaron y construyeron 4 boquillas de inyección con diferente espesor de película anular de agua y núcleo de aceite. El criterio de diseño está expresado en términos del radio normalizado del núcleo de aceite y del factor de fricción reducido al hacer cambiar el espesor de la película anular. La Tabla II presenta las características de las boquillas.

TABLA II
GEOMETRÍA Y MODELO DE LA BOQUILLA DE INYECCIÓN

Empaquetado del flujo anular: Espesor de película de agua δ (mm) ● Modelo general de la boquilla R_T = Radio total y R_O = Radio del núcleo de aceite (mm) ●	
B1	$\delta = 13.2$
	
B2	$\delta = 10.4$
	
B3	$\delta = 7.55$
	
B4	$\delta = 4.35$
	



III. RESULTADOS EXPERIMENTALES Y DISCUSIÓN

Las mediciones se realizaron empleando flujos volumétricos estables de agua mientras que los flujos de aceite fueron aumentando gradualmente. En el caso del patrón de flujo anular la velocidad superficial de la mezcla fue determinada con la información experimental mostrada en la Fig. 2. La cual sugiere que la U_{SO} debe ser al menos 3.4 veces mayor que la U_{SW} para formarlo en una tubería vertical ascendente como en [28].

Se debe hacer mención que el concepto de una viscosidad bifásica aceite-agua es complejo. Sin embargo, la viscosidad de una mezcla es generalmente calculada usando la fracción del aceite y del agua como un factor de peso. En contraste, para este estudio se utilizó el concepto de una viscosidad efectiva y la fracción volumétrica superficial de las fases suponiendo flujo homogéneo sumando las aportaciones volumétricas.

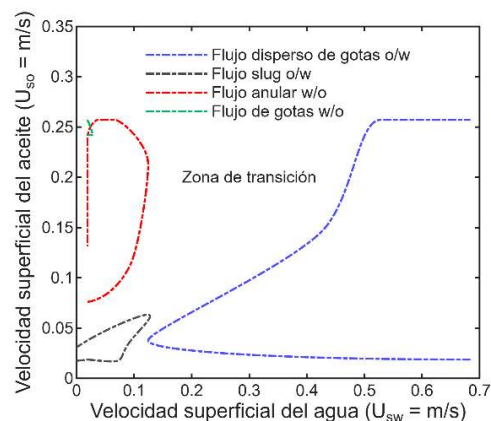


Fig. 2. Carta de patrones de flujo aceite-agua hallados en los experimentos. La tubería vertical tiene un diámetro de 40 mm y flujo ascendente. El aceite empleado fue de 29.29 API y $\mu_o=506$ cP. Las líneas discontinuas son polinomios de tercer grado representados los límites entre los patrones de flujo.

El dominio de la mezcla bifásica se describió como aceite en agua (o/w) y agua en aceite (w/o). Los patrones de flujo anular observados en este experimento se clasificaron en cuatro patrones con cada boquilla y son mostrados en la Tabla III. Las observaciones se describen tras un estudio detallado de los videos en alta velocidad utilizando técnicas visuales y una escala métrica colocada en la tubería, considerando la curvatura media de la superficie.

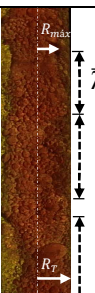
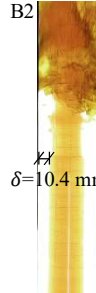
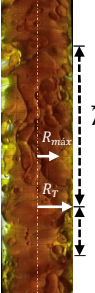
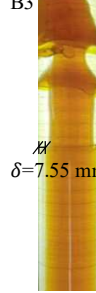
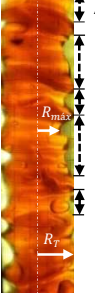
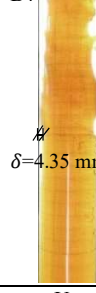
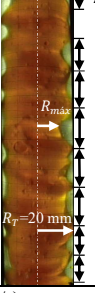
A. Flujo Anular

La transición del flujo anular ocurrió cuando la velocidad del aceite fue, por un lado, lo suficientemente alta para provocar la formación de ondas estables en la interfase del núcleo, pero por otro lado más baja que la velocidad necesaria para generar inestabilidades y provocar la transición a flujo semi-anular. En los patrones de flujo anulares (w/o), el núcleo de aceite ocupó la fase dominante ($\beta_o=0.78$) y la fase dispersa la ocupa la película anular de agua ($\beta_w=0.22$).

En la Tabla III, (B1 y B2). Se describe un flujo anular con grandes ondulaciones interfaciales perturbado en la interfase por gotas de aceite, las cuales son atomizadas por el efecto inestable de Kelvin Helmholtz y flujo con vórtices en escala mayor.

Debido a esta inestabilidad, la película anular de agua se contamina de aceite, generando que en ciertas secciones de la interfase la cresta de la onda alcance la pared interna de la tubería lo que suma aportaciones locales de pérdida de presión por fricción. El flujo de aceite turbulento en estas boquillas produjo fluctuaciones no estacionarias para la condición de $3.8 \leq d \leq 4.8$. Enseguida, en la condición $3 \leq d \leq 5$ la energía se disipa y los efectos difusivos se vuelven dominantes sobre los advectivos en el flujo de aceite, dando lugar al flujo anular desarrollado.

TABLA III
VISTA DE LOS FLUJOS ANULARES Y BOQUILLA DE INYECCIÓN EN UNA TUBERÍA
VERTICAL ASCENDENTE

Boquilla ↑	Flujo Anular ↑	Valle $\bar{\lambda}$ (mm)	Ro (mm)	Error absoluto de película (mm)
B1 		15	18	3.2
B2 		27	13	5.4
B3 		17	15	0.55
B4 		12	18	0.35
Uso = 0.27 (m/s) Usw = 0.08 (m/s)				

El efecto de la vorticidad en la inyección del aceite se caracterizó con la aparición de fluctuaciones fluidodinámicas como la velocidad y presión, con tamaños y tipos de gotas de aceite no simétricas en diferentes escalas de atomización.

Se observaron mejores resultados con las boquillas B3 y B4. En la Tabla III, la distribución del espesor de la película anular de agua (color blanco) se mantiene estable ya que mantiene amortiguado el núcleo de aceite con fracciones volumétricas de aceite ($\beta_0 \geq 0.7$). En el caso del flujo con B4, la relación amplitud/longitud de onda disminuye en la zona interfacial y la

tendencia del gradiente de presión se reduce notablemente en relación con los esfuerzos de corte en la pared del tubo, ya que difieren para cada fase con diferente viscosidad y densidad.

Una vez que se forman estas ondas son estables en la interfase y se deslizan alrededor de la tubería debido al bajo suministro de agua en forma de película.

B. Modelado Matemático

El modelo propuesto para la pérdida de presión se puede expresar de la siguiente manera.

$$\left(\frac{dp}{dz}\right) = \left(\frac{dp}{dz}\right)_a + \left(\frac{dp}{dz}\right)_f + \left(\frac{dp}{dz}\right)_g \quad (1)$$

El gradiente de presión se expresó como la suma de los componentes debido a la aceleración $(dp/dz)_a$, a la fricción $(dp/dz)_f$ y a la gravedad $(dp/dz)_g$. En el caso de los efectos inerciales, se despreció debido a los Reynolds muy bajos de las fases. El efecto gravimétrico de la mezcla afectado por $\theta = 90^\circ$ en una tubería lisa se consideró como la energía que se pierde en forma de fricción en el experimento. La misma condición fue aplicada en el anulo de agua. Por lo tanto, la ecuación (2) se propuso como sigue:

$$\left(\frac{\Delta P}{\Delta z}\right)_f = \left[\frac{P_1 - P_2}{z}\right] - [\gamma(w - o)]H \quad (2)$$

En vista de que el modelo incorpora parámetros importantes de los fluidos como la viscosidad y la densidad (API). Se compararon los aceites 29.29, 21.47 API y agua. Esto debido a que el efecto gravimétrico depende del peso y de las fracciones másicas de las fases. En la Fig. 3 se muestran los resultados obtenidos.

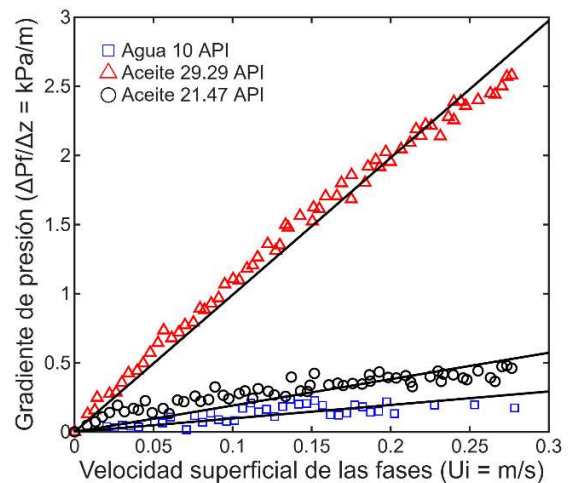


Fig. 3. Comparación de los gradientes de presión en una fase. Aceite de 29.29 API con $\mu_0 = 506$ cP, aceite de 21.47 API con $\mu_0 = 97$ cP y agua con 10 API (1 cP).

Se observó que el gradiente de presión al conducir el aceite de 29.29 API incrementa 24 veces, y con el 21.47 API aumentó 4 veces comparado con el valor que se obtiene al conducir el flujo de agua (fluido más pesado). Por lo que la pérdida de presión se origina principalmente por la diferencia de viscosidades de las fases y demostró tener poca relevancia con el peso aun cuando se aplica al campo gravimétrico.

Sin embargo, en el modelo, la fracción volumétrica de no deslizamiento se usó para determinar la densidad de la mezcla, lo cual conduce a una subpredicción del gradiente de presión

gravitacional determinado por la ecuación (3).

$$-\left[\frac{dp}{dz}\right]_g = \rho_M g \sin(\theta) \quad (3)$$

Por otro lado, la determinación del factor de fricción se basó en el número de Reynolds de la mezcla bifásica definido como sigue.

$$Re_M = \frac{\rho_M U_{SM} d}{\mu_M} \quad (4)$$

Al tratarse de una tubería lisa y un régimen de flujo laminar, los valores de las constantes en la ecuación general de Blasius fueron rigurosamente $C=16$ y $n=1$.

$$f_F = C(Re_M)^{-n} \quad (5)$$

Las ecuaciones (6-10) permitieron desarrollar los fluxes volumétricos de la mezcla bifásica:

$$\dot{m}_W = \rho_W \bar{U}_W A_W = \rho_W U_{SW} A \quad (6)$$

$$\dot{m}_O = \rho_O \bar{U}_O A_O = \rho_O U_{SO} A \quad (7)$$

$$\beta_O = \frac{U_{SO}}{U_{SW} + U_{SO}} \quad (8)$$

$$\beta_W = \frac{U_{SW}}{U_{SW} + U_{SO}} \quad (9)$$

$$\beta_O + \beta_W = 1 \quad (10)$$

El conjunto de ecuaciones descritas fue aplicado al patrón de flujo anular. Se inyectó la película anular de agua ($\beta_W = 0.22$) con el propósito de comparar el radio normalizado del núcleo de aceite ($R^*=1$) con cada boquilla y de esta forma establecer un criterio con el factor de fricción. La Fig. 4 presenta los resultados.

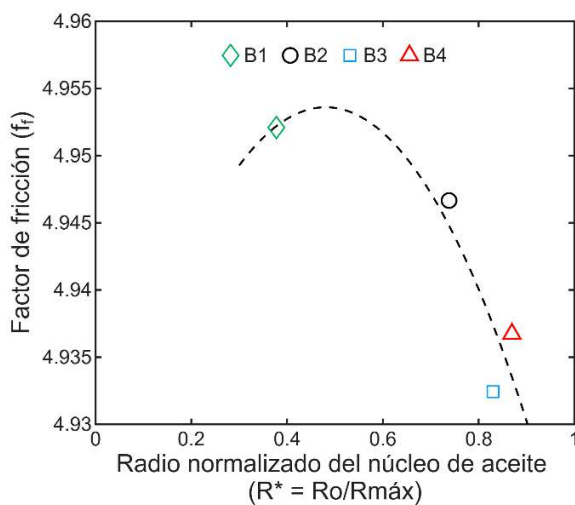


Fig. 4. Factor de fricción del flujo anular generado con las boquillas de inyección. El radio normalizado del núcleo se estudió con el aceite de 29.29 API y $\mu_O = 506$ cP con flujo ascendente.

Los resultados experimentales demuestran que las boquillas adecuadas para transportar el aceite en el patrón de flujo anular son la B3 y B4. Sin embargo, la boquilla B1 y B2 están alejadas del grupo. Lo que indica que sus dimensiones no favorecen la estabilidad del núcleo de aceite en relación con el parámetro $R^*=1$. Y por otro lado f_F tiende a aumentar, por lo que otros componentes como las fuerzas capilares influyen en el componente gravimétrico. Para este análisis se presenta el número de Eötvös.

$$Bo = \frac{\Delta \rho g R_{máx}^2}{\sigma} \quad (11)$$

Aunque la ecuación (5) conviene generalmente con los resultados experimentales, una mejor exactitud y escalamiento se alcanzó comparando el gradiente de presión con el número de Reynolds y el número de Eötvös. La Fig. 5 muestra el resultado del gradiente de presión con las boquillas y sin boquilla al conducir el aceite. La Fig. 6 define la influencia de las fuerzas capilares en la pérdida de presión del flujo anular.

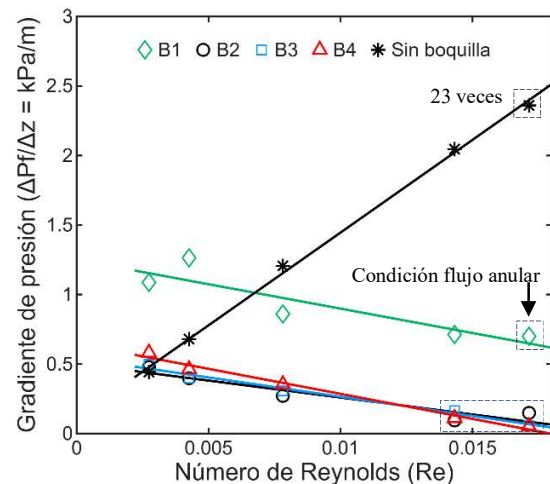


Fig. 5. Comparativo experimental del gradiente de presión por fricción en los flujos anulares y en el flujo monofásico de aceite de 29.29 API y $\mu_O = 506$ cP. Se utilizaron las cuatro boquillas de inyección.

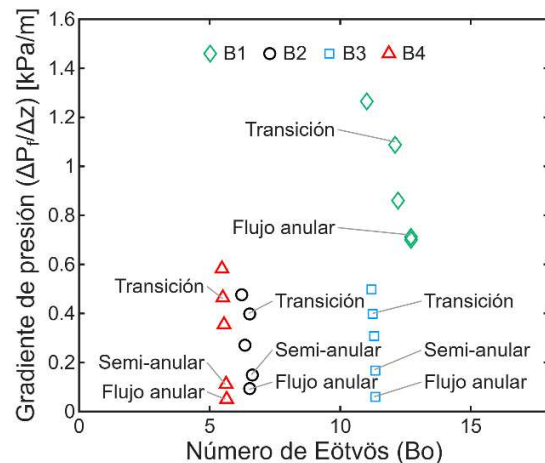


Fig. 6. Influencia del número de Eötvös en la caída de presión por fricción. El aceite fue de 29.29 API y $\mu_O = 506$ cP. Se utilizaron las cuatro boquillas de inyección.

La caída de presión en un flujo bifásico puede ser comparable con la que se tiene en un fluido monofásico de baja viscosidad, por ejemplo, el agua en la zona anular. Lo que determina un modelo multiplicador bifásico cuantificable introducido por Martinelli. El cual, evalúa el cociente del gradiente de presión del flujo de aceite y del flujo anular aplicado a la ecuación (2).

En la Fig. 5, el modelo multiplicador bifásico presentó un valor cuantificable de hasta 23 veces más de caída de presión

comparado cuando se condujo la misma cantidad de aceite ($\dot{m}_0=0.29$ kg/s) en el esquema de flujo anular. Comprobando la efectividad del método aplicado y el modelo con las ecuaciones (2) y (3).

En la Fig. 6 el número de Eötvös obtenido del análisis experimental ($Bo > 1$) indicó que el sistema es afectado en menor medida por los efectos de tensión superficial.

El fenómeno se describió bajo el concepto de que la tensión superficial en la interfase aceite-agua evita que el núcleo se rompa, preservándolo como fase dominante (w/o). Dando por hecho que mientras en el sistema las fuerzas de flotación predominan, ejercen mecánicamente un efecto de alargamiento en dirección paralela al sentido de flujo y, por otro lado, la tensión interfacial producida perimetralmente en el núcleo actúa en contra parte para estabilizarlo.

En comparativa, la boquilla B1 presentó una tendencia ascendente en el gradiente de presión en todos los casos. Sin embargo, se requieren técnicas experimentales más avanzadas para su estudio ya que la película anular es compleja de examinar en la visualización experimental de los videos de alta velocidad debido a su inestabilidad interfacial y diferentes escalas de atomización (Tabla III).

IV. CONCLUSIÓN

Los resultados de las pruebas y análisis experimentales indican que la pérdida de presión por fricción de un flujo monofásico de aceite y dos fases líquidas inmiscibles aceite-agua dependen principalmente de su viscosidad dinámica y tienen poca relevancia con la densidad en grados API, por lo que un aceite puede ser pesado y ofrecer baja pérdida por fricción en la tubería.

Las boquillas de inyección que presentaron resultados favorables en relación con la estabilidad y baja pérdida de presión fueron la B3 y B4. Se sugiere utilizar la boquilla B4 ya que su configuración geométrica contribuye a mantener el núcleo de aceite amortiguado por la película de agua a una velocidad específica, reduciendo significativamente la potencia de bombeo, alcanzando una ganancia energética de hasta 23 veces según el resultado del gradiente de presión.

En general se puede determinar que la dinámica y la estructura del núcleo de aceite es definida por cada una de las boquillas de inyección y un equilibrio de fuerzas internas generadas por las propiedades de los fluidos. Por lo que el núcleo no puede soportar grandes esfuerzos de corte interfacial sin deformarse, entonces, para cada velocidad superficial del aceite se generó un valor numérico que determina la interfase del núcleo normalizado, satisfaciendo este equilibrio de fuerzas.

Se describieron nuevos métodos de diseño de la boquilla de inyección con aplicación práctica y de caída de presión en el transporte de petróleo con flujo lubricado en una tubería vertical ascendente.

REFERENCIAS

- [1] A. Kamel, O. Alomair, and A. Elsharkawy, *Compositional Based Heavy Oil Viscosity Model for Kuwaiti Heavy Crude Oils*. Paper presented at the SPE Heavy Oil Conference and Exhibition, Kuwait City, December 2016. <https://doi.org/10.2118/184140-MS>
- [2] Y. Wen and A. Kantzas, *Evaluation of Heavy Oil/Bitumen-Solvent Mixture Viscosity Models*, J. Can. Petroleum Techn. 45 (2006). <https://doi.org/10.2118/06-04-04>
- [3] H.-Q. Zhang, D. H. Vuong, and C. Sarica, *Modeling High-Viscosity Oil/Water Flows in Horizontal and Vertical Pipes*. Paper presented at the SPE Annual Technical Conference and Exhibition, Florence, Italy, September 2010. <https://doi.org/10.2118/135099-MS>
- [4] E. Pagan, W. C. Williams, S. Kam, and P. J. Waltrich, *Modeling vertical flows in churn and annular flow regimes in small-and large-diameter pipes*. Paper presented at the 10th North American Conference on Multiphase Technology, Banff, Canada, June 2016.
- [5] 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*, Chem. Eng. Research and Design. 78 (2000) 404–418. <https://doi.org/10.1205/026387600527301>
- [6] F. Jiang, Y. Wang, J. Ou, and C. Chen, *Numerical Simulation of Oil-Water Core Annular Flow in a U-Bend Based On The Eulerian Model*. Chem. Eng. Technol. 37 (2014) 659–666. <https://doi.org/10.1002/ceat.201300809>
- [7] J. R. Nichol and E. Kuru, *Observations of sub-regimes in vertical annular flow*. Paper presented at the 10th North American Conference on Multiphase Technology, Banff, Canada, June 2016.
- [8] J. V. N. de Sousa, C. H. Sodré, A. G. B. de Lima, and S. R. de F. Neto, *Numerical Analysis of Heavy Oil-Water Flow and Leak Detection in Vertical Pipeline*, Advances in Chemical Engineering and Science. 03 (2013) 9–15. <https://doi.org/10.4236/aces.2013.31002>
- [9] D. P. Chakrabarti, G. Das, and P. K. Das, *The transition from water continuous to oil continuous flow pattern*, AIChE Journal. 52 (2006) 3668–3678. <https://doi.org/10.1002/aic.10988>
- [10] O. M. H. Rodriguez, A. C. Bannwart, and C. H. M. de Carvalho, *Pressure Loss in core-annular flow: modeling, experimental investigation and full-scale experiments*, J Pet Sci Eng. 65 (2009) 67–75. <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2008.12.026>
- [11] O. M. H. Rodríguez and A. C. Bannwart, *Experimental study on interfacial waves in vertical core flow*, J. Petroleum Sci. and Eng. 54, (2006) 140–148. <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2006.07.007>
- [12] R. V. A. Oliemans, G. Ooms, H. L. Wu, and A. Duijvestijn, *The core-annular oil/water flow: turbulent-lubricating-film model and measurements in a 5 cm pipe loop*, Int. J. Multiphase Flow 13 (1987) 23–31. [https://doi.org/10.1016/0301-9322\(87\)90004-8](https://doi.org/10.1016/0301-9322(87)90004-8)
- [13] O. Cazarez, D. Montoya, A. G. Vital, and A. C. Bannwart, *Modeling of three-phase heavy oil-water-gas bubbly flow in upward vertical pipes*, Int. J. Multiphase Flow 36 (2010) 439–448. <https://doi.org/10.1016/j.ijmultiphaseflow.2010.01.006>
- [14] R. Gupta, C. K. Turangan, and R. Manica, *Oil-Water Core-Annular Flow In Vertical Pipes: A CFD Study*, Canadian J. Chem. Eng. 94 (2016) 980–987. <https://doi.org/10.1002/cjce.22451>
- [15] Y. Dai, D. Dakshinamoorthy and M. Agrawal, *CFD modeling of bubbly, slug and annular flow regimes in vertical pipelines*. Paper presented at the Offshore Technology Conference, Houston, Texas, USA, May 2013. <https://doi.org/10.4043/24245-MS>
- [16] L. Zhengchun, S. Robello, A. Gonzales and Y. Kang, *Blowout well-flow simulation for deepwater drilling using high-pressure/ high-temperature (hp/ht) black-oil viscosity model*. Paper presented at the SPE/IADC Drilling Conference and Exhibition, London, England, UK, March 2015. <https://doi.org/10.2118/173074-MS>
- [17] E. Burlutskiy and C. K. Turangan, *A computational fluid dynamics study on oil-in-water dispersion in vertical pipe flows*, Chem. Eng. Research and Design 93 (2015) pp.48–54. <https://doi.org/10.1016/j.cherd.2014.05.020>
- [18] D. H. Vuong, H. Q. Zhang, C. Sarica, and M. Li, *Experimental Study on High Viscosity Oil/Water Flow in Horizontal and Vertical Pipes*. Paper presented at the SPE Annual Technical Conference and Exhibition, New Orleans, Louisiana, October 2009. <https://doi.org/10.2118/124542-MS>
- [19] S. Atmaca, C. Sarica, H. Zhang, and A. Al-Sarkhi, *Characterization of Oil/Water Flows in Inclined Pipes*. Paper presented at the Denver SPE Proj Fac & Const 4 (2009), 41–46. <https://doi.org/10.2118/115485-PA>
- [20] J. Nossen, *Heavy Crude Oil Flow Patterns Heavy Oil Technology for Offshore Applications Stavanger*, Paper presented at the ASME 2001 Engineering Technology Conference on Energy (2003). <https://doi.org/10.1115/ETCE2001-17060>
- [21] D. D. Joseph, R. Bai, K. P. Chen, and Y. Y. Renardy, *Core-Annular Flows*, Annual Review of Fluids Mechanics 29 (1997) 65–90.

- <https://doi.org/10.1146/annurev.fluid.29.1.65>
- [22] G. P. Lucas and N. Panagiotopoulos, *Oil volume fraction and velocity profiles in vertical, bubbly oil-in-water flows*, Flow Measurement and Instrumentation, 20 (2009) 127–135.
<https://doi.org/10.1016/j.flowmeasinst.2009.02.005>
- [23] A. Miadonye, V. R. Puttagunta, R. Srivastava, S. S. Huang, and Y. Dafan, *Generalized Oil Viscosity Model For The Effects Of Temperature Pressure And Gas Composition Generalized Oil Viscosity Model For The Effects Of Temperature, Pressure And Gas Composition*, J Can Pet Technol 36 (1997).
<https://doi.org/10.2118/97-01-04>
- [24] M. Pietrzak, M. Placzek, S. Witczak, *Upward Flow of Air-Oil-Water in Mixture in Vertical pipe*, J. Experimental Thermal and Fluid Science 81 (2017) 175–186.
<https://dx.doi.org/10.1016/j.expthermflusci.2016.10.021>
- [25] J. R. Santos, M. G. de la Torre, A. A. Guevara, C. R. Castillo, and F. C. Rizo, *Estimation of discharge coefficients for orifices thin-walled, in physical models*, Rev Lasallista de Investigacion 15 (2018) 20–32. <https://doi.org/10.22507/RLI.V15N2A2>
- [26] S. Rushd and R. S. Sanders, *A parametric study of the hydrodynamic roughness produced by a wall coating layer of heavy oil*, Pet Sci 14 (2017) 155–166.
<https://doi.org/10.1007/s12182-016-0144-z>
- [27] M. Ameri, N. Tirandaz, *Two phase flow in a wavy core-annular configuration through vertical pipe: analytical model for pressure drop in upward flow*, Int. J. Mech. Scien. 126 (2017) 151–160.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2017.03.034>
- [28] I. N. Sierra, F. Sánchez, I. Carvajal, M. Toledo, *Experimental study of flow patterns and pressure losses in vertical flows of oil-water mixtures*, DYNA Engineering and Industry 99 (2024) 131–135.
<https://doi.org/10.6036/10839>