

# Estudio experimental de los patrones de flujo y las pérdidas de presión en flujos verticales de mezclas aceite-agua

*Experimental study of flow patterns and pressure losses in vertical flows of oil-water mixtures*



Irving Sierra-Sánchez, Florencio Sánchez-Silva, Ignacio Carvajal-Mariscal, Mónica Toledo-García  
Instituto Politécnico Nacional, ESIME UPALM (México)

DOI: <https://doi.org/10.6036/10839>

## 1. INTRODUCCIÓN

Alrededor de dos tercios de las reservas mundiales de petróleo restantes pertenecen a la categoría de petróleo super pesado, caracterizado por su alta viscosidad ( $\mu = 1,000$  cP) y baja gravedad API ( $\leq 10$ ) [1]. Transportar este tipo de petróleo por oleoductos es un reto 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 [2]. 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 [3]. Varios estudios han investigado los flujos de petróleo y agua en una tubería vertical ascendente. Mukherjee et al. [4] y Flores et al. [5] examinaron el gradiente de presión y la retención. Luo et al. [7] se centraron en la pérdida de presión y la inversión de fase. Farrar y Bruun [6], Abdvayt y otros [10], Jana y otros [13], Odie y otros [9], Descamps y otros [11], y Hu y Angeli [12] estudiaron los regímenes y patrones de flujo. Liu et al. [14], Rodríguez y Bannwart [15], y Zhao et al. [16] exploraron la estructura y las caracterís-

ticas locales del flujo interfacial. Además, Luo et al. [7] realizaron estudios sobre la pérdida de presión y la inversión de fase, mientras que Nigmatulin et al. [8] llevaron a cabo mediciones de los efectos gravimétricos.

Estudios recientes de Jingyu Xu et al. [17] se centraron en los gradientes de presión por fricción en una tubería vertical ascendente para mezclas de petróleo y agua. Encontraron altos valores de gradiente de presión ( $\sim 2.5$  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. [18] caracterizaron un montaje experimental con una boquilla de inyección de geometría cónica, que inducía patrones de flujo, pero no mostraron el efecto que produce la boquilla en los gradientes de presión. Bannwart et al. [19] identificaron visualmente patrones de flujo, incluyendo arrastre de gotas de aceite en flujo anular, pero no proporcionaron información sobre 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

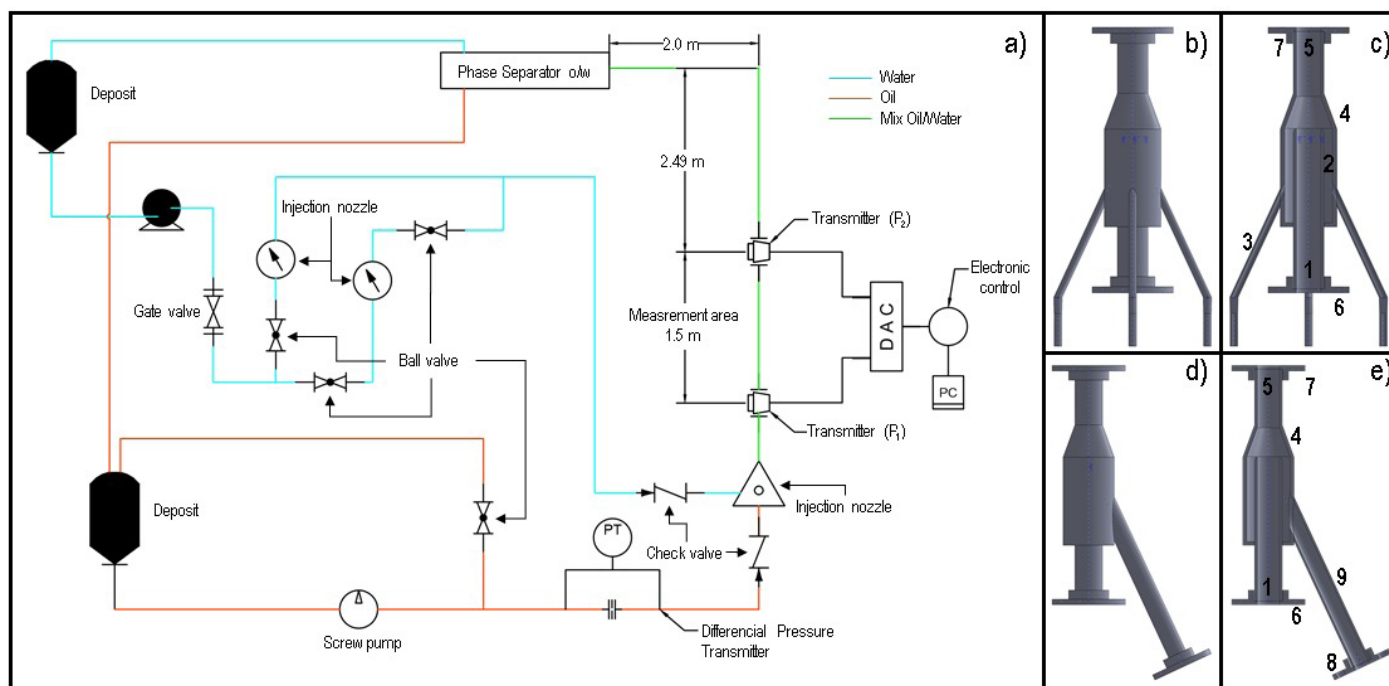


Figura 1. a) Esquema mecánico de la instalación experimental construida en el LABINTHAP para estudiar los patrones de flujo aceite-agua en un tubería vertical ascendente. Boquilla de inyección B1 utilizada para inducir el patrón de flujo anular en un flujo ascendente de aceite-agua en una tubería vertical, b) vista general de la boquilla, c) vista interna de la boquilla. Boquilla de inyección B2 con una confluencia de un flujo de agua en uno de aceite, d) vista general de la boquilla, e) vista interna de la boquilla.

API	Densidad (kg/m <sup>3</sup> )	Viscosidad $\mu$ (cP)
49.6	781.3	30.7
47.8	789.1	1,500
37.1	839.2	66.5
28.3	885	90

Tabla 1. Características físicas del grupo de aceites estudiados

en una tubería vertical ascendente, lo que dificulta las evaluaciones hidrodinámicas detalladas. Por ello, la motivación de este trabajo es obtener más información y ofrecer detalles sobre el tipo de boquilla y la metodología para inducirlos.

## 2. MONTAJE EXPERIMENTAL

La instalación experimental se encuentra en el LABINTHAP del Instituto Politécnico Nacional, (Figura 1a). Se utiliza para estudiar las pérdidas de presión causadas por la fricción 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 pulgadas) transparente de Policloruro de Vinilo. Los diámetros de las tuberías para el petróleo y el agua son de 0.038 m y 0.025 m (1 pulgada), respectivamente. Se emplean dos tipos de boquillas, B1 y B2. Los 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. Los instrumentos de medición fueron calibrados para garantizar la confiabilidad y trazabilidad de las mediciones [20].

Se diseñaron y probaron las dos boquillas de inyección, B1 y B2, que tienen una configuración geométrica especial para inducir patrones de flujo. Las boquillas se muestran en las figuras 1b, 1c, 1d y 1e.

## 2.1. SELECCIÓN DEL ACEITE

Para garantizar la formación de patrones de flujo y evaluar el tipo de emulsión, se realizaron experimentos con diversos aceites y se mezclaron con agua en contacto con el aire. El objetivo era determinar el tiempo de recuperación del aceite por el método de decantación y establecer así los criterios de la metodología experimental. La tabla 1 muestra las características físicas de los aceites.

Las figuras 2 (a) y (b) muestran los resultados obtenidos en los experimentos de mezcla de aceite y agua.

Se observó en ambos casos (Figura 2 (a, b)) que el tiempo de separación de las mezclas de aceite y agua depende de la cantidad de volumen del aceite y, en menor medida, del volumen del agua. Es decir, si el volumen de aceite es mayor que el de agua, los tiempos de separación y las emulsiones aumentan considerablemente. De acuerdo con los resultados de las emulsiones producidas por las mezclas y sus tiempos de separación, el aceite API 28.3 tuvo características favorables para realizar el experimento, este aceite presentó una baja emulsión y un tiempo de separación de  $200 \text{ s} \geq t \geq 60 \text{ s}$ .

## 3. RESULTADOS EXPERIMENTALES

Los patrones de flujo de aceite-agua encontrados en la tubería vertical ascendente se clasificaron como (o/w) aceite-en-agua y (w/o) agua-en-aceite.

### 3.1. PATRONES DE FLUJO

El patrón de flujo slug se caracteriza por una gran burbuja de Taylor y consiste en la alternancia de grandes gotas de aceite y tapones de agua. Las figuras 3a)-3d) muestran fotos del flujo slug obtenido en este estudio y la figura 4a, puntos turquesa. La zona de burbujas Taylor estaba dominada por aceite con gotas de agua

dispersas (w/o), mientras que el tapón de agua llevaba gotas de aceite dispersas. La longitud de la celda era de aproximadamente 3.9 diámetros, y el tamaño de las gotas de aceite oscilaba entre 1.8 y 2 diámetros, lo que resultaba en una distancia de 2 a 2.5 diámetros entre los tapones de agua. El volumen medio de los tapones de agua era de  $90.726,5 \text{ mm}^3$  ( $9.1 \times 10^{-2}$  litros) con una longitud media de 2.1 diámetros en una tubería de 38.1 mm de diámetro. Ajustando la velocidad del agua ( $U_{SW} = 9.42 \times 10^{-2} \text{ m/s}$ ) con un número de Reynolds agua ( $Re_w = 3.5$ ) y la velocidad del aceite ( $U_{SO} = 3.76 \times 10^{-2} \text{ m/s}$ ) con un número de Reynolds aceite ( $Re_o = 0.5$ ) se consiguió el flujo slug. La diferencia de velocidad y longitud entre los slugs de aceite-agua y los de gas-líquido se debe principalmente a la diferencia de densidades entre el aire y el agua. La velocidad de un slug de aceite es de unos  $4.2 \times 10^{-2} \text{ m/s}$ , mientras que la de un slug de aire supera 1 m/s.

Las figuras 3a y 3b muestran la gota de aceite en forma de bala alargada (slug, representado en amarillo) y los tapones de agua en azul turquesa, y que son análogos a la burbuja de Taylor en un flujo líquido-gas. La señal del gradiente de presión mostrada en la figura 4(a) presenta oscilaciones con una amplitud de frecuencia que representa más de 7 oscilaciones de presión apreciables dentro de un intervalo de 1.7 a 2 kPa/m en un lapso de 35 segundos. La amplitud media de las oscilaciones es de 1.8 kPa/m. Sin embargo, se observaron algunas variaciones en la magnitud de la presión atribuidas al paso de los slugs. En este caso, la velocidad del slug fue de  $U_{slug} = 4.2 \times 10^{-2} \text{ m/s}$ .

Los patrones de flujo de gotas de agua y aceite en un tubo vertical ascendente están influidos por factores geométricos, reológicos e hidrodinámicos, que dictan su comportamiento, desarrollo y transitoriedad. Las figuras 3e-3g muestran la distri-

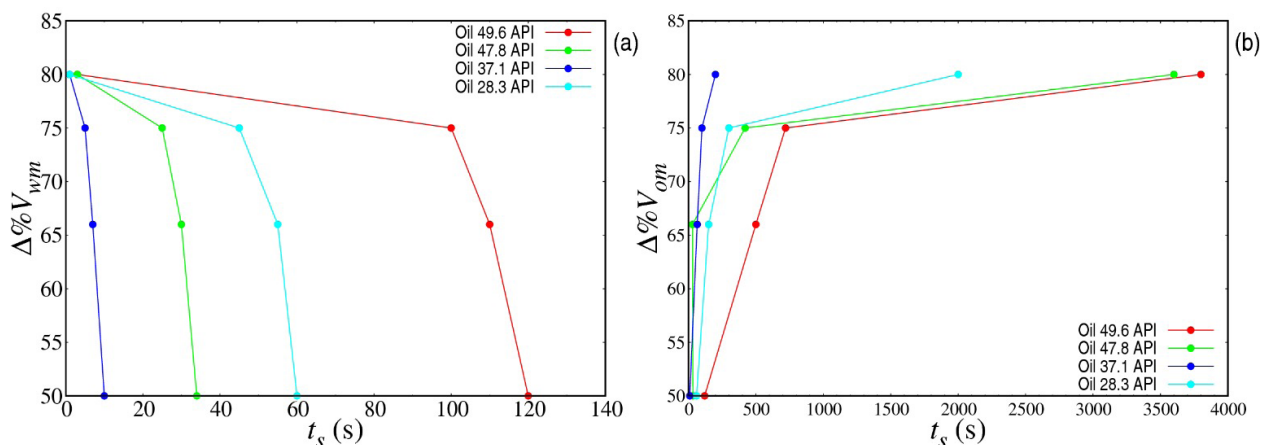


Figura 2. (a) Tiempo de separación ( $t_s$ ) de los tipos de mezclas de aceite y agua en presencia de aire, manteniéndose fijo un volumen de aceite (50 ml). (b) Tiempo de separación de los tipos de mezclas de aceite y agua en presencia de aire, manteniendo fijo el volumen de agua (50 ml).

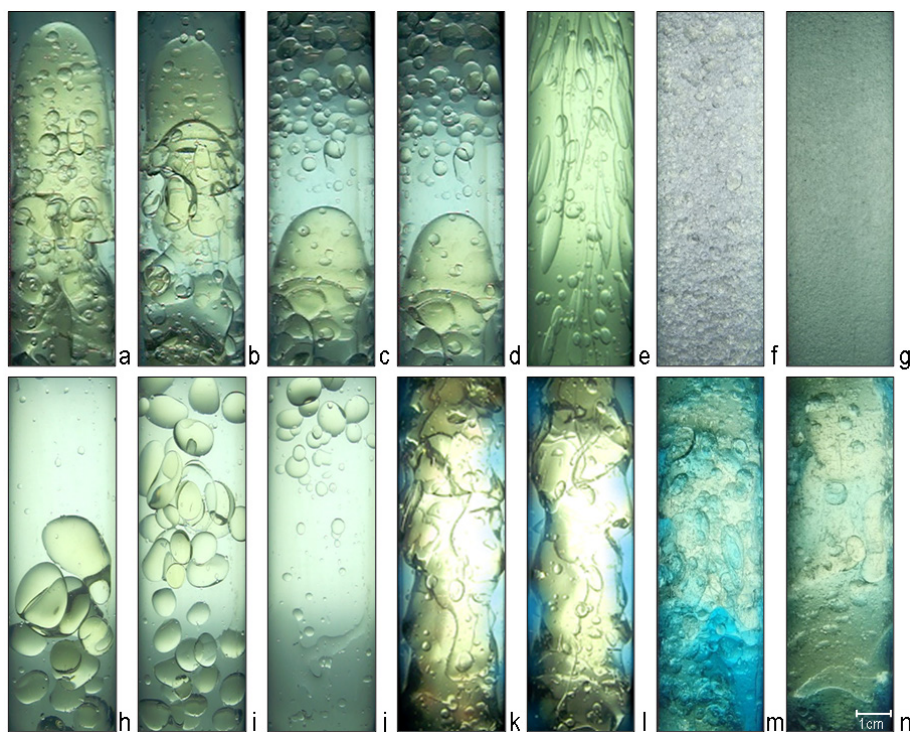


Figura 3. Patrón de flujo slug, a) y b) es la longitud de la gota de aceite, c) y d) es la longitud del tapón de agua. e) Patrón de flujo de la gotas w/o con  $U_{sw} = 1.88 \times 10^{-2}$  m/s y  $U_{so} = 0.257$  m/s, f) patrón de flujo de gotas o/w con  $U_{sw} = 0.684$  m/s y  $U_{so} = 0.257$  m/s, y g) Patrón de flujo de gotas finas o/w con  $U_{sw} = 0.684$  m/s y  $U_{so} = 5.0 \times 10^{-2}$  m/s. Las fotos se tomaron a 39.3 diámetros después de la descarga de la boquilla B1. h, i) y j) patrón de flujo de gotas alternas de aceite en agua o/w. Fotos tomadas secuencialmente cada 3 segundos a una distancia de 39.3 diámetros después de la descarga de la boquilla B1 con  $U_{sw} = 1.88 \times 10^{-2}$  m/s y  $U_{so} = 1.87 \times 10^{-2}$  m/s.

bución de estos patrones de flujo de gotas. En la figura 3e se representa un patrón de flujo de gotas w/o, en el que la velocidad del aceite ( $U_{so}$ ) es 13.7 veces mayor que la del agua ( $U_{sw}$ ). Las gotas de agua forman núcleos alargados que se desplazan dentro de la fase de aceite. Estos núcleos de agua alargados se hacen gradualmente más finos y largos hasta que se rompen y se desplazan hacia arriba. La rotura se debe principalmente a la tensión de esfuerzo interfacial producida por alta viscosidad del aceite respecto al agua. El fenómeno no da lugar a la coalescencia de las gotas de agua, lo que significa que las gotas pequeñas no se fusionan con las más grandes ni con los núcleos alargados.

Los números de Reynolds de ambos flujos indican un flujo laminar:  $Re_o = 3.3$  y  $Re_w = 0.70$ , siendo el número de Reynolds del aceite 4.7 veces mayor que el del agua. En la figura 3f se muestra un patrón de flujo de gotas o/w. Las gotas de aceite se desplazan linealmente hacia arriba dentro del flujo de agua, formando una forma más grande y agrupada en comparación con los otros flujos de gotas (Figuras 3e y 3g). Este patrón de flujo se produce a  $Re_o = 3.3$  y  $Re_w = 26$ , siendo el número de Reynolds del agua 7.8 veces mayor que el del aceite. Esta diferencia crea una fuerza mecánica de arrastre sobre las gotas de

aceite. Las gotas de aceite presentan una geometría irregular, con un tamaño medio que oscila entre 3 y 5 mm. La figura 3g muestra un patrón de flujo de finas gotas de aceite dispersas en agua o/w. Este patrón se consigue fijando la velocidad superficial del agua ( $U_{sw} = 0.684$  m/s,  $Re_w = 26$ ) mientras se reduce la velocidad del aceite ( $U_{so} = 5.0 \times 10^{-2}$  m/s,  $Re_o = 0.65$ ). En estas condiciones, el número de Reynolds del agua es 40 veces mayor que el del aceite, lo que hace que las fuerzas de inercia adquiridas por el agua dominen la fase dispersa y produzcan arrastre.

El patrón de flujo de las finas gotas de aceite dispersas en el agua o/w mostró una típica señal de gradiente de presión con un valor medio de 0.6 kPa/m (Figura 3g y Figura 4a puntos verdes y azules). El valor de 0.6 kPa/m de pérdida de presión debida a la fricción se correlaciona con el efecto viscoso del aceite, que ocupa una fracción de volumen menor en la mezcla en relación con el agua, por lo que fluye con menor resistencia al cizallamiento.

Por otro lado, la señal de gradiente de presión del patrón de flujo de gotas de aceite o/w (puntos verdes en la Figura 4a) y Figura 3f) presentaba un valor medio de pérdida de presión de 1.2 kPa/m. Esto dio lugar a más de 7 oscilaciones notables con pequeñas variaciones de aproximada-

mente 0.3 kPa/m. Las oscilaciones correspondían a la presencia de grandes gotas de aceite en el agua, lo que indicaba la fracción volumétrica de gotas de aceite en el agua. El patrón de flujo también mostraba caos hidrodinámico y aglomeración de gotas de aceite cuando la velocidad superficial del aceite se mantenía alta.

Además, se observó un patrón de flujo alternativo de gotas o/w cuando se realizaron pequeños flujos (Figura 3h-j y Figura 4a puntos rojos) y se catalogó como la transición al patrón de flujo slug (Figura 3a-d y Figura 4a puntos turquesa).

Las figuras 3h, i) y j) representan el patrón de flujo de gotas alternas o/w, con formas geométricas elipsoidales acompañadas de tapones de agua. Las observaciones experimentales mostraron la entrada de un tapón de agua seguido de gotas de aceite dispersas en agua (Figura 3h). Durante un periodo de 3 segundos, las gotitas de aceite adoptaron formas elipsoidales y coalescencia para formar gotas de aceite alargadas, lo que indica la transición al patrón de flujo slug (Figura 3i). La figura 3j) ilustra la distribución de las gotas o/w tras otro intervalo de 3 segundos, en el que las gotas de aceite iban acompañadas de un tapón de agua que contenía unas pocas gotas finas de aceite. Los tapones de agua tenían un volumen medio de 91.21 mm<sup>3</sup> y una longitud media de 2.1 diámetros. La figura 4, puntos cian, muestra el gradiente de presión de fricción observado en el patrón de flujo representado en las figuras 3h, i) y j). El gradiente de presión presenta oscilaciones superiores a 7, con una amplitud que oscila entre 1.9 y 2 kPa/m a lo largo de un periodo de 35 segundos y la amplitud de la frecuencia refleja un patrón intermitente caracterizado por la coalescencia y acumulación de grupos de gotas de aceite seguidas de tapones de agua.

En el patrón de flujo anular, tiene una película anular de agua que cubre el perímetro de un flujo de aceite conducido en el centro o en el núcleo por medio de una tubería. La película anular de agua está en contacto interfacial con la pared interna de la tubería. Esta interacción genera fricción interfacial, que depende de la viscosidad del fluido en contacto y de la rugosidad interna de la tubería. Las figuras 3k y l, ilustran dos fotos del patrón de flujo anular obtenido durante el experimento utilizando la boquilla B1 (figuras 1b y c). Las condiciones de flujo implicaron una velocidad del agua de  $U_{sw} = 8.77 \times 10^{-2}$  m/s y una velocidad del aceite de  $U_{so} = 0.30$  m/s, y un aceite de 28.3 API. Estas fotos se tomaron a una distancia de



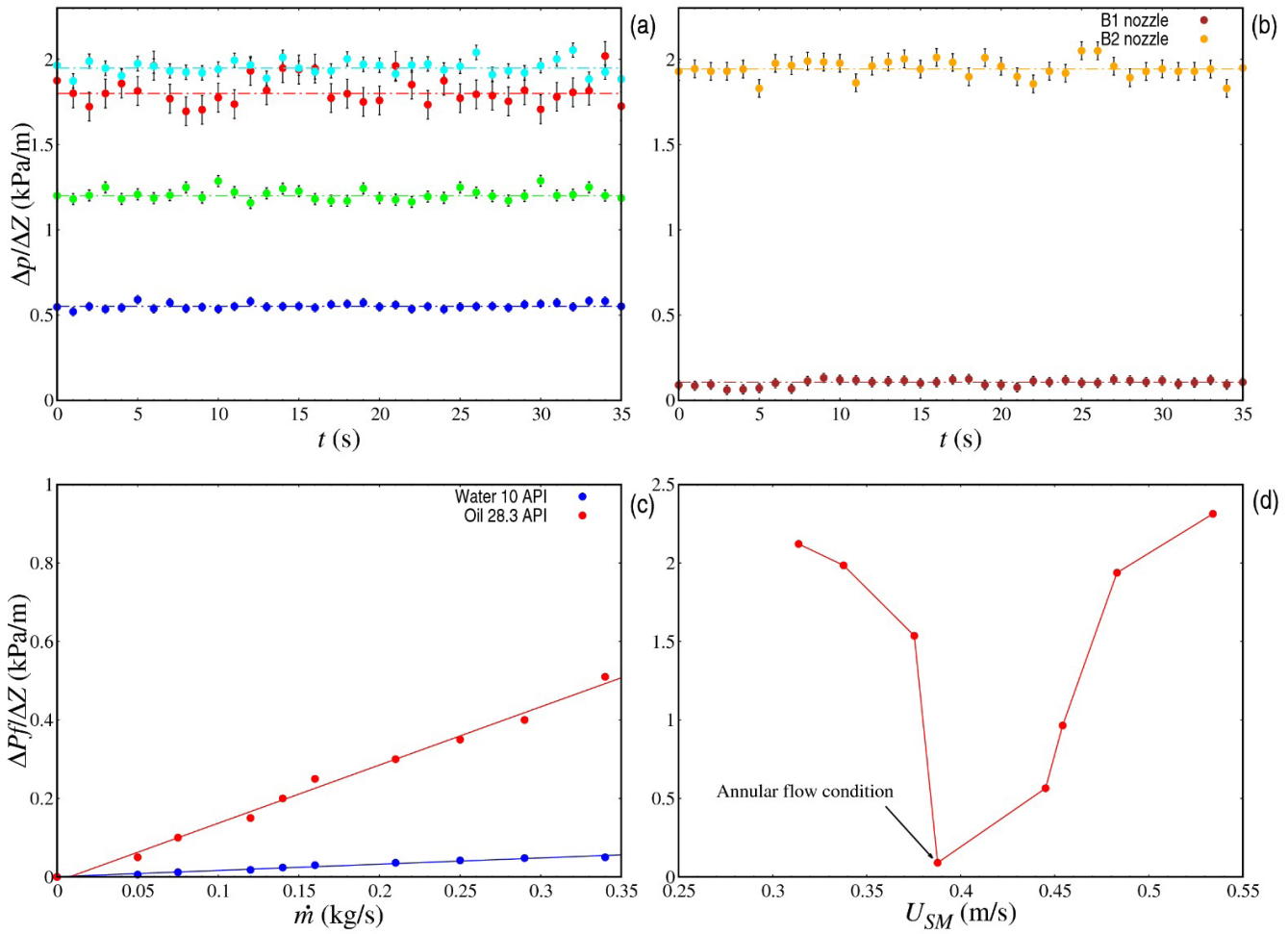


Figura 4. Señal típica de un patrón de flujo slug o-w. (a) Puntos rojos, las condiciones de flujo fueron  $U_{SO} = 3.76 \times 10^{-2}$  m/s,  $Re_o = 0.5$  y  $U_{SW} = 9.42 \times 10^{-2}$  m/s,  $Re_w = 3.5$ . Muestra los gradientes de presión asociados a los flujos de gotas mostrados en las figuras 3b y 3c. Puntos azules, Flujo de finas gotas de aceite en agua con  $U_{SW} = 0.684$  m/s y  $U_{SO} = 5.0 \times 10^{-2}$  m/s. Puntos verdes, Flujo de gotas de aceite en agua, con  $U_{SW} = 0.684$  m/s y  $U_{SO} = 0.257$  m/s. Puntos cian, gradiente de presión para un Flujo de gotas alternas de aceite en agua o/w con  $U_{SW} = 1.88 \times 10^{-2}$  m/s y  $U_{SO} = 1.87 \times 10^{-2}$  m/s. (b) Puntos naranjas, Flujo semi-anular con  $U_{SW} = 8.77 \times 10^{-2}$  m/s,  $Re_w = 3.3$  y  $U_{SO} = 0.30$  m/s,  $Re_o = 4$ , ilustra los gradientes de presión por fricción utilizando la boquilla B2. Puntos marrones, Flujo anular con  $U_{SW} = 8.77 \times 10^{-2}$  m/s,  $Re_w = 3.3$  y  $U_{SO} = 0.30$  m/s,  $Re_o = 4$ , ilustra los gradientes de presión por fricción utilizando boquilla B1. Se utilizó aceite de 28.3 API y 90 cP. (c) Pérdida de presión debida a la fricción al conducir un flujo monofásico de aceite y un flujo monofásico de agua. (d) Pérdida de presión debido a la fricción al conducir el aceite en el esquema de flujo anular. Aceite de 28.3 API y 90 cP con  $U_{SW} = 8.77 \times 10^{-2}$  m/s ( $\dot{m}_w = 0.108$  kg/s) y  $U_{SO} = 0.30$  m/s ( $\dot{m}_o = 0.302$  kg/s). La velocidad de mezcla es:  $U_{SM} = U_{SO} + U_{SW} = 0.387$  m/s.

39.3 diámetros de la tubería, después de la descarga de la boquilla B1.

Basándose en las observaciones registradas, se determinó que inyectar primero el agua en la tubería, seguida del aceite, impide que el fluido más viscoso se adhiera a la pared interna. Sin embargo, se requieren más estudios para investigar los métodos y criterios de inyección a fin de comprender cómo se puede inducir el patrón de flujo anular en diferentes condiciones.

Las figuras 3k y l muestran el flujo anular de aceite-agua en una tubería vertical con flujo ascendente. La región de color amarillo representa el núcleo de aceite, mientras que la zona azul turquesa representa la película de agua en la zona anular. Se utilizó la boquilla B1 (Figura 1 b), c) junto con el aceite de 28.3 API y  $\mu = 90$  cP. Las fotos se tomaron a una distancia de 39.3 diámetros de tubería después de la descarga de la boquilla, el gradiente

de presión se presenta en la Figura 4 b) en puntos marrones. Pasando a la Figura 3 m), n), muestra dos fotos del patrón de flujo semi-anular. Estas fotos se capturaron en condiciones de flujo idénticas, incluyendo una velocidad del agua de  $U_{sw} = 8.77 \times 10^{-2}$  m/s,  $Re_w = 3.3$  y una velocidad del aceite de  $U_{so} = 0.30$  m/s,  $Re_o = 4$ , con el aceite de 28.3 API. Sin embargo, en este caso se empleó la boquilla B2 (Figura 1 d), e)). El gradiente de presión se presenta en la Figura 4 b) en puntos naranjas.

Por otra parte, para calcular el modelo de pérdida de presión debida a la fricción para un flujo homogéneo, se utilizaron las ecuaciones (1), (2) y (3). La ecuación (1) tuvo en cuenta la fracción volumétrica superficial de cada fase, garantizando que su suma fuera igual a la unidad. La ecuación (2) determinó el gradiente de presión medio, integrando el gradiente de presión en el tiempo total (T) del fenómeno.

### 3.2. AHORRO DE ENERGÍA EN EL FLUJO ANULAR DE ACEITE

Se realizó un experimento para examinar la pérdida de presión causada por la fricción en un flujo monofásico de aceite de 28.3 API con una viscosidad de 90 cP y un flujo monofásico de agua con un 10 API y una viscosidad de 1 cP (Figura 4(c)).

La figura 4(c) demuestra que la pérdida de presión por fricción al transportar el aceite es al menos 9 veces mayor que la observada en el flujo de agua cuando los fluidos se transportan por separado. Esta discrepancia se atribuye principalmente a la diferencia de viscosidades entre los dos fluidos (90 cP para el aceite y 1 cP para el agua), ya que mientras que el agua tiene 10 API y el aceite 28.3 API, es más pesada que el aceite. Para calcular el gradiente de presión se utilizó la ecuación (3).

Se realizó un segundo estudio para examinar el gradiente de presión debido a la fricción en el flujo anular y aceite de

28.3 API con una viscosidad de 90 cP. El objetivo era compararlo con el gradiente de presión observado con el flujo monofásico del mismo aceite, pero sin la presencia de la película anular de agua. En este estudio, el flujo de aceite se mantuvo a  $U_{so} = 0.30$  m/s, y se introdujeron flujos de agua en forma de película anular a  $U_{sw} = 1.4 \times 10^{-2}$  m/s. Se utilizó la boquilla B1 para inducir el flujo anular. Los resultados se presentan en la Figura 4(d).

La figura 4(d) muestra la pérdida de presión debida a la fricción en el flujo anular de aceite. Las condiciones implican el aceite de 28.3 API con una viscosidad de 90 cP,  $U_{sw} = 8.77 \times 10^{-2}$  m/s ( $\dot{m}_w = 0.108$  kg/s) y  $U_{so} = 0.30$  m/s ( $\dot{m}_o = 0.302$  kg/s). La velocidad de mezcla  $U_{sm} = U_{so} + U_{sw}$  y asciende a 0.387 m/s. En las condiciones de  $U_{sm}$  especificadas que se muestran en la figura 4(d), la pérdida de presión mínima debida a la fricción se alcanza en 0.1 kPa/m cuando se transportan 0.302 kg/s de aceite en el esquema de flujo anular. Esto significa que el ahorro de energía es 5 veces mayor en comparación con la energía necesaria para el flujo monofásico de aceite (sin la película de agua anular) en las mismas condiciones de flujo de 0.302 kg/s (Figura 4(c)). Además, la figura 4 (d) revela que, a medida que las condiciones de flujo de agua varían dentro del intervalo de 0.314 a 0.483 m/s manteniendo  $U_{so} = 0.30$  m/s, el patrón de flujo anular se sitúa en una zona de transición en la que la pérdida de presión empieza a aumentar.

#### 4. CONCLUSIONES

En conclusión, se construyó y caracterizó un montaje experimental para estudiar los patrones de flujo bifásico agua-aceite, en particular el patrón de flujo anular. El estudio se llevó a cabo con un aceite de 28.3 API y 90 cP de viscosidad. Se desarrollaron dos tipos de boquillas, B1 y B2, para inducir diferentes patrones de flujo. La boquilla B1 produjo flujo slug, gotas de aceite en agua, gotas de agua en aceite, alternancia de gotas de aceite en agua y flujo anular. La boquilla B2 produjo un flujo semi-anular. El gradiente de presión para el flujo anular con la boquilla B1 se redujo sustancialmente, dando lugar a una pérdida mínima de presión por fricción cuando se transporta a través de la tubería. Sin embargo, la boquilla B2 tuvo un gradiente de presión más alto y una mayor pérdida de presión. Por lo tanto, se recomienda la boquilla B1 para inducir el flujo anular. Además, se observó que la pérdida de presión por fricción está influida en gran medida por la viscosidad de

los fluidos, más que por la diferencia de grados los API. Otro análisis reveló que la inyección de una película anular de agua a una velocidad específica reduce significativamente la pérdida de presión por fricción en el flujo de aceite, lo que produce un notable ahorro de energía. Esto sugiere que, para el transporte de petróleo super pesado y altamente viscoso ( $API \leq 10$  y  $\mu \geq 1,000$  cP), inducir el flujo anular puede suponer un ahorro sustancial de energía debido a la reducción de la pérdida de presión por fricción.

#### REFERENCIAS

- [1] Brommer P. A primer of oilwell drilling. The International Association of Drilling Contractors. University of Texas at Austin. Petroleum extension service. 2008.
- [2] Romero O. J., Saad H. C., Pereira I. B., and Romero M.I. Influence of heat transfer on two-phase flow behavior in onshore oil pipelines. *Engineering and Research* vol. 36 No.1, april-2016 (14-22). DOI:<http://dx.doi.org/10.15446/ing.investig.v36n1.51570>.
- [3] Hasan S. Rheology of heavy crude oil and viscosity reduction for pipeline transportation. Presented in Patrial Fulfillment of the Requirements for the Degree of Master of Applied Science (Mechanical Engineering) at Concordia University Montreal, Quebec, Canada 2007. ISBN: 978-0-494-34627-3.
- [4] Mukherjee, H., Brill, JP, Beggs, HD, 1981. Experimental study of oil-water flow in inclined pipes. *J. Energy Res. Technol.* 103, 56-66.
- [5] Flores, J. G., Sarica, C., Chen, TX, Brill, JP, 1998. Investigation of holdup and pressure drop behavior for oil-water flow in vertical and deviated wells. *J. Energy Res. Technol.* 120, 8-14.
- [6] Farrar, B., Bruun, HH, 1996. A computer based hot-film technique used for flow measurements in a vertical kerosene-water pipe flow. *Int. J. Multiphase Flow* 22, 733-751.
- [7] Luo, YS, Chen, TK, Cai, JY, 1997. Frictional pressure loss and phase inversion point for oil-water emulsion in vertical tube. In: *Proc. of Int. Symp. on Multiphase Fluid, Non-Newtonian Fluid and Physico-Chemical Fluid Flows*, vol. 3, p. 53-58.
- [8] Nigmatulin, TR, Bonetto, FJ, Larreteguay, AE, Lahey Jr., RT, McQuillen, JB, 2000. An experimental study of dispersed liquid/liquid two-phase upflow in a pipe. *Chem. Eng. Commun.* 182, 121-162.
- [9] Oddie G, Shi H, Durlfosky LJ, Aziz K, Pfeffer B, Holmes JA, 2003. Experimental study of two and three phase flows in large diameter inclined pipes. *Int. J. Multiphase Flow* 29, 527-558.
- [10] Abduvayt, P., Manabe, R., Watanabe, T., Arihara, N., 2006. Analysis of Oil/Water Flow Tests in Horizontal, Hilly Terrain, and Vertical Pipes, *SPE Prod. Oper.*, February, pp. 123-133.
- [11] Descamps, M., Oliemans, RVA, Ooms, G., Mudde, RF, Kusters, R., 2006. Influence of gas injection on phase inversion in an oil-water flow through a vertical tube. *Int. J. Multiphase Flow* 32, 311-322.
- [12] Hu, B., Angeli, P., 2006. Phase inversion and

- associated phenomena in oil-water. *Vertical pipeline flow*. *Dog. J. Chem. Eng.* 84, 94-107.
- [13] Jana, AK, Ghoshal, P., Das, G., Das, PK, 2007. An analysis of pressure drop and holdup for liquid-liquid upflow through vertical pipes. *Chem. Eng. Technol.* 30, 920- 925.
  - [14] Liu, L, Matar, O., Lawrence, J., Hewitt, G., 2006a. Laser-induced fluorescence (LIF) studies of liquid-liquid flows. Part I: flow structures and phase inversion. *Chem. Eng. Sci.* 61, 4007-4021.
  - [15] Rodriguez, OMH., Bannwart, AC., 2006. Experimental study on interfacial waves in vertical core flow. *J. Petrol. Sci. Eng.* 54, 140-148.
  - [16] Zhao, D., Guo, J., Hu, X., Zhang, X., Wang, X., 2006. Experimental study on local characteristics of oil-water dispersed flow in a vertical pipe. *Int. J. Multiphase Flow* 32, 1254-1268.
  - [17] Xu, Jin-yu., Li, Dong-hui., Jun G., Wu, Ying-xiang. Investigations of phase inversion and frictional pressure gradients in upward and downward oil-water flow in vertical pipes. *International Journal of Multiphase Flow* 36 (2010) 930-939. DOI: 10.1016/j.ijmultiphaseflow.2010.08.007.
  - [18] Mydlarz-Gabryk K., Pietrzak, M., Troniewski. Study on oil-water two-phase upflow in vertical pipes. *Journal of Petroleum Science and Engineering* 117 (2014) 28-36. <http://dx.doi.org/10.1016/j.petrol.2014.03.007>.
  - [19] Bannwart, AC., Rodriguez, OMH., de Carvalho, CHM., Wang, IS., Vara, RM. Flow patterns in heavy crude oil-water flow. *Journal of Energy Resources Technology*, vol 126/185. DOI: 10.1115/1.1789520.
  - [20] V. Lucia Da Silveria Nantes Button. Principles of Measurement and transduction of Biomedical variables. ACADEMIC doi. <http://10.1016/B978-0-12-800774-7.00007-6>. 2015.

#### AGRADECIMIENTOS

I.S.-S. agradece el apoyo financiero del Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías (CONAHCYT) bajo la subvención No. CVU: 717206 como parte de su programa de doctorado. También agradece al LABINTHAP, ESIME-Z-IPN por las facilidades brindadas para su trabajo de investigación doctoral.

#### MATERIAL SUPLEMENTARIO

[https://www.revistadyna.com/documentos/pdfs/\\_adic/10839-1.pdf](https://www.revistadyna.com/documentos/pdfs/_adic/10839-1.pdf)

