

ESTUDIO EXPERIMENTAL DEL COMPORTAMIENTO DEL FLUJO BIFÁSICO A BAJAS VELOCIDADES SUPERFICIALES EN UNA COMBINACIÓN DE TUBERÍAS INCLINADA-VERTICAL

EXPERIMENTAL STUDY OF THE BIPHASIC FLOW BEHAVIOR AT LOW SUPERFICIAL VELOCITIES IN AN INCLINED-VERTICAL PIPE COMBINATION

F. Sánchez-Silva*, I. Carvajal-Mariscal, R.J. Rejón-Torres, M. Toledo-Velázquez
Instituto Politécnico Nacional, ESIME, UPALM, Av. IPN s/n, Ciudad de México 07738, México

Recibido 8 de junio de 2017; Aceptado 21 de noviembre 2017

Resumen

Se estudió experimentalmente el comportamiento del flujo bifásico en una tubería inclinada-vertical, teniendo como problemática principal el fenómeno denominado *slug* severo. Para ello se diseñó, construyó y se caracterizó una instalación experimental con el fin de simular el *riser* de una plataforma petrolera con problemas de *slug* severo. Se realizaron pruebas variando las velocidades superficiales de ambas fases. Se utilizaron transductores de presión y sondas de anillos para medir la presión, la frecuencia del *slug* y la fracción volumétrica; los instrumentos se conectaron a un sistema de adquisición de datos y a una PC para su análisis posterior. Las pruebas realizadas a diferentes velocidades superficiales del gas y del líquido, indican que estos parámetros tienen una gran influencia en el comportamiento del *slug* severo, tanto en la frecuencia del *slug* como en la fracción volumétrica.

Palabras clave: *slug* severo, experimental, tubería inclinada-vertical, *riser*, flujo bifásico.

Abstract

The two-phase flow behavior in downward inclined and vertical pipes combinations has been studied experimentally, mainly when the problem nominated severe slugging is present in the system. For this purpose an experimental set up was designed, built and characterized, in which the two-phase flow in an oil platform having the severe slugging can be simulated. The experimental tests were undertaken by changing the superficial velocities of both phases. Pressure transducers and ring conductance probes were used to measure pressure, slug frequency and void fraction; all instruments were connected to a data logger and a PC for the posterior results analysis. The experimental runs executed at different superficial velocities, indicate that these parameters have an important influence in the severe slugging behavior, mainly in the *slug* frequency and the void fraction.

Keywords: severe slug, experimental, inclined-vertical pipe, riser, two-phase flow.

1 Introducción

Un desafío importante que plantea la industria petrolera es el desarrollo de tecnología sobre flujos bifásicos para el transporte del petróleo y gas desde las unidades de producción ubicadas en alta mar, hasta instalaciones para su procesamiento en plataformas cercanas o bien en tierra. Las tuberías, instaladas en el fondo del mar conectan los pozos, de donde se extrae la mezcla de petróleo, y el *riser* (tramo vertical o inclinado ascendente) hacia la plataforma de producción, ya que el primer proceso es la separación de las fases. El flujo que pasa a través de las tuberías ubicadas en el lecho marino por lo general contiene

agua, petróleo y gas, cuya composición es muy variada. El cambio de composición ocasiona serios problemas operacionales en las tuberías, los cuales pueden provocar daños severos al equipo y al personal que los opera, como se señala en, Farghaly y col (1987) y Sausen y col (2012).

Al inicio de la producción, la alta presión del yacimiento facilita la extracción del recurso, sin embargo, conforme pasa el tiempo, el flujo producido se reduce gradualmente, ya que la presión interna del pozo disminuye, lo cual se traduce en un aumento de las dificultades de extracción del recurso, así como en las inestabilidades del sistema.

Debido a que el transporte de la mezcla tiene un costo muy alto, la instalación de nuevas líneas es

* Autor para la correspondencia. E-mail: fsanchez@ipn.mx
doi: 10.24275/uam/izt/dcbi/revmexingquim/2018v17n1/Sanchez
issn-e: 2395-8472

raramente una opción viable. Por lo tanto, se debe utilizar el sistema de tuberías existentes, que con el tiempo se vuelve un sistema sobrado, debido al decrecimiento gradual de la presión y del flujo. Esta nueva situación provoca inestabilidades en el sistema de transporte ya que da origen a un patrón de flujo estratificado en los tramos de tubería descendentes, y en los ascendentes se puede producir el fenómeno conocido como *slug* severo, Bendiksen y col (1982).

El *slug* severo se caracteriza por la formación de un gran tapón de líquido que bloquea la tubería vertical de producción (*riser*) obstruyendo el paso de gas hacia el separador. Cuando la presión del gas, que se acumula en la línea inclinada, sobrepasa la presión ejercida por la columna de líquido en la parte baja del *riser*, provoca que el líquido contenido en la tubería vertical salga expulsado abruptamente del *riser* hacia el equipo de separación, pudiéndose originar problemas irreversibles para estos últimos. Sin embargo, el flujo *slug* severo no es un problema exclusivo en los sistemas de producción de aguas profundas, aunque la utilización de *risers* de gran longitud incrementa los problemas del *slug* severo, en comparación con los problemas que representa en los sistemas de producción instalados en aguas someras, Sausen y col. (2012).

El *slug* severo puede ocurrir también a altas presiones con un consecuente aumento en las fluctuaciones de presión, estas fluctuaciones reducen el periodo natural del flujo con una consecuente disminución en la producción, lo que puede culminar en el abandono prematuro del pozo o bien la pérdida de las reservas Sausen y col. (2012).

Varios investigadores han contribuido al estudio de este fenómeno, Bendiksen y col. (1982); Taitel y col. (1990); Fabre y col. (1990); Yasumasa y col. (2007); Wang y col. (2016); Cruz Maya y col. (2007); Sánchez y col. (2007) y Xiaoming y col. (2011). Todos ellos concuerdan que el proceso de formación del fenómeno se compone de las siguientes etapas:

1. La mezcla bifásica ingresa a la tubería inclinada en el patrón de flujo estratificado y la fase líquida se acumula en la parte inferior de la sección vertical. Esto bloquea el paso del gas y provoca su acumulación y compresión en la sección inclinada.
2. Cuando el nivel de líquido en la tubería vertical (*riser*), alcanza la parte superior de esta sección, es decir cuando $Z = h$, el líquido empieza a fluir suavemente hacia el separador.
3. Una vez que el gas acumulado en la sección inclinada, alcanza la parte inferior de la tubería vertical, significa que la presión en el gas acumulado ha igualado la presión hidrostática de la columna, por lo tanto, el tapón de líquido que se formó en el *riser* fluye abruptamente hacia el separador, desalojando la columna vertical.
4. Después del desalojo del *riser*, parte del líquido contenido en el *slug* escurre por las paredes interiores de la tubería vertical promoviendo una acumulación en la parte inferior de esta sección. Con esto, se inicia la formación de un nuevo tapón de líquido, y el ciclo de formación del *slug* severo reinicia.

El *slug* severo es un fenómeno que induce vibraciones en el sistema, las cuales se propician por la formación alternada de tapones de líquido en el *riser* y las altas velocidades que alcanza en su desalojo. Por lo tanto, el *slug* severo es un fenómeno de naturaleza temporal que origina inestabilidades en el sistema, ya que existen periodos sin aportación de líquido al separador, cuando el fenómeno está en formación, y otros donde se aporta una buena cantidad de líquido, es decir, cuando el tapón de líquido es expulsado del *riser*.

Se han realizado varias investigaciones para comprender, reducir o eliminar este fenómeno, sin embargo ninguno ha logrado resultados convincentes y atractivos tanto técnica como económicamente (Schmidt y col. (1980); Pots y col. (1985); Hill (1990); Jansen y col. (1994); Henriot y col. (2001); López (2006); Ogazi y col. (2011); Jahanshahi y col. (2012) y Xing y col. (2013)).

En este artículo se presentan resultados experimentales que permiten tener un mejor entendimiento cualitativo y cuantitativo del comportamiento y formación del flujo *slug* severo en la conexión en serie de tuberías horizontal, inclinada y vertical (*riser*).

2 Fenómeno físico

El patrón de flujo *slug* fue observado desde las primeras investigaciones sobre flujo bifásico, y las condiciones bajo las cuales ocurre fueron determinadas por Baker en 1954. El flujo *slug* es probablemente el régimen más representativo en el transporte de mezclas bifásicas, se puede considerar

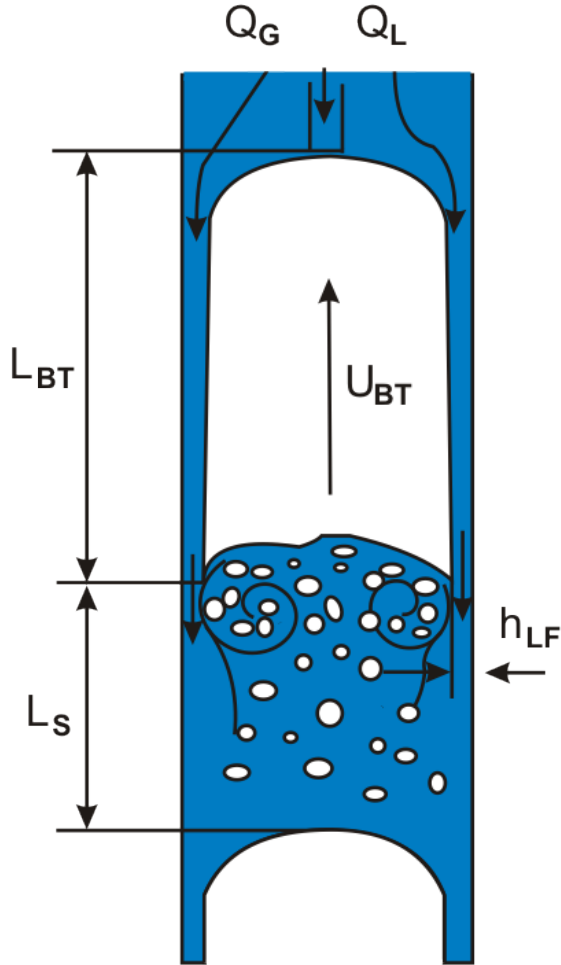


Fig. 1. Flujo slug en una tubería vertical.

que está compuesto por una sección, donde existe flujo burbujeante, y otra, donde el flujo está estratificado como es el caso del flujo horizontal y una sucesión de flujo burbujeante y flujo anular en el caso de flujo vertical. Se comporta en tiempo y espacio como una sucesión de grandes burbujas de aire alternadas por tapones de líquido con cierta cantidad de burbujas (*slug*), Andreussi y col. (1989).

El flujo *slug* en tuberías verticales es caracterizado por burbujas eje-simétricas en forma de bala, también llamadas burbujas de Taylor que están rodeadas por una película de líquido. A la parte inferior que contiene las pequeñas burbujas se le conoce como *slug* o tapón. Las burbujas de Taylor se mueven hacia arriba a velocidades constantes cuando ellas se encuentran totalmente desarrolladas dentro del flujo. En la parte inferior de la burbuja se desarrolla un vórtice, el cual se crea por la penetración de la burbuja a la parte líquida y con esta acción genera una película alrededor de

la burbuja. El cortante entre la película y la burbuja de Taylor crea los vórtices (Fig. 1), Barnea y col. (1985); Baliño y col. (2007); Raad (2009); Mayor y col. (2007).

Por otro lado, Barnea y col. (1987) realizaron un estudio completo de las transiciones de los patrones de flujo en un amplio rango de inclinaciones y condiciones experimentales presentando un modelo unificado. Precisamente en ese trabajo se basan las condiciones para generar el patrón de flujo estratificado en la sección inclinada.

2.1 Flujo slug severo en risers

El fenómeno denominado *slug* severo se caracteriza por la formación de un gran tapón de líquido que bloquea la tubería vertical de producción (*riser*) obstruyendo el paso de gas hacia el separador. Cuando la presión del gas en la línea inclinada sobrepasa la presión ejercida por la columna de líquido en el fondo del *riser*, provoca que el líquido contenido en la tubería vertical salga expulsado abruptamente del *riser* hacia el equipo de separación, pudiéndose originar problemas irreversibles para estos sistemas.

Para iniciar el análisis de este fenómeno, es importante que se determinen los parámetros que están involucrados en el *slug* severo:

- Longitud y diámetro de las tuberías inclinada y vertical
- Ángulo de inclinación de la sección inclinada
- Longitud horizontal de ingreso al separador
- Radio de curvatura de los codos para las secciones, inclinada vertical y vertical horizontal, de la parte superior del riser.

Propiedades de los fluidos involucrados

- Densidad del gas y del líquido.
- Viscosidad de las fases.
- Peso molecular del gas.

Condiciones de operación

- Flujo másico del líquido y del gas.
- Presión del gas en la tubería inclinada.
- Presión en el separador de fases.
- Temperatura del líquido y del gas.

Aunque todos estos parámetros afectan al fenómeno, no lo hacen con la misma intensidad. En este estudio solo se probaron varios flujos de agua y aire, con el fin de comprender la hidrodinámica del fenómeno y en un artículo posterior se mostrará el efecto de la geometría.

Recientemente se ha continuado haciendo trabajo experimental y teórico en el tema, lo que indica que es un tema de actualidad. Por ejemplo, Lanchang y col. (2013) proponen un método de mitigación del efecto del *slug* severo utilizando una tubería ondulada, formada por varios codos e instalada antes del *riser*, logrando algún resultado positivo. Adegboyega y col. (2016) realizaron un estudio experimental en una combinación tubo horizontal-*riser* de 2" con el fin de comprender más a fondo el comportamiento del *slug* severo y desarrollar estrategias de control apropiados, encontraron tres tipos de *slug* severo que necesitan caracterizarse para su control adecuado. Por otro lado, Luo Xiaoming y col. (2011) desarrollaron un estudio experimental y determinaron tres tipos de *slug* severo para tuberías inclinadas-*riser* y solo dos regímenes para una tubería horizontal. LinWang y col. (2016) desarrollaron un modelo matemático 1D basado en balances de masa de ambas fases y un balance de momentum que compararon contra datos experimentales obteniendo resultados satisfactorios. También hicieron un estudio numérico con lo que pueden predecir los detalles del *slug* severo para diferentes condiciones. Jing Gong y col. (2014) estudiaron el *slug* severo en

tuberías en forma de L y en tuberías flexibles que se utilizan en pozos marinos, también proponen un modelo 1D y en cuasiequilibrio, los resultados tienen una buena relación con los experimentos y se pretende usarlos para fines de control. Maleksadeh (2012) en su tesis de maestría formula de manera general un modelo de *slug* severo para tuberías inclinadas muy largas, realiza un estudio tanto experimental como numérico, utilizando un modelo de arrastre, simuló numéricamente el fenómeno teniendo buenos resultados. Experimentalmente probó que el *slug* severo puede ocurrir aún en arreglos de tubo horizontal-*riser*. Ingrid Sofie Solstand (2015), en su tesis de maestría desarrolló una serie de experimentos en varios arreglos de *risers*. Su objetivo era estabilizar el fenómeno y se encontró que es necesario continuar con su estudio ampliando el rango de condiciones.

3 Diseño del experimento

La instalación experimental se diseñó y construyó considerando la reproducción del flujo *slug* severo, para una tubería inclinada con un ángulo, θ , respecto a la horizontal y una longitud (L_1), conectada a una tubería vertical con una longitud L_2 , con el fin de obtener datos suficientes del *slug* severo, para comprenderlo, simularlo y proponer algún método para eliminarlo.

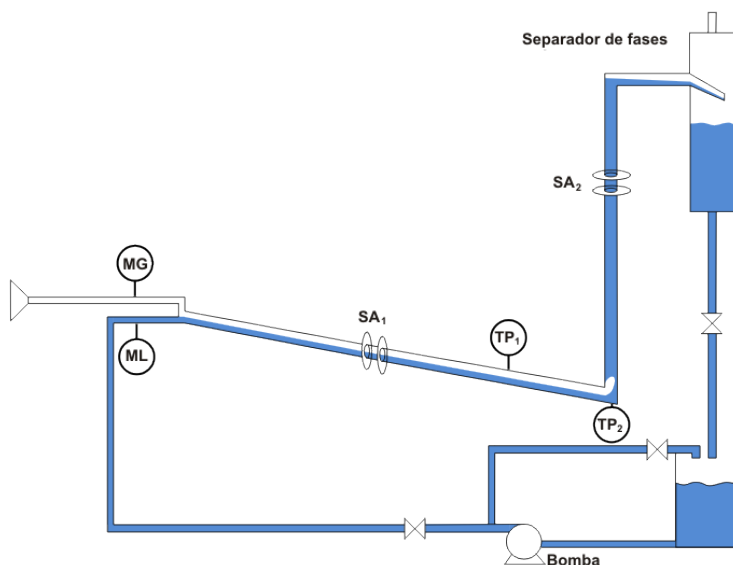


Fig. 2. Esquema de la instalación experimental. SA_1 , SA_2 - sondas de anillos; TP_1 , TP_2 - transductores de presión; MG, ML - medidores del flujo de gas y líquido.

Tabla 1. Matriz experimental para el mapeo, $L_1 = 4$ m, $L_2 = 3$ m y $\theta = 30$.

$\theta = 30$	$L_1 = 4$ m	$L_2 = 3$ m	Matriz experimental A		
Usg	0.131	0.263	0.526	0.657	0.822
Usl					
0.065	A11	A12	A13	A14	A15
0.131	A21	A22	A23	A24	A25
0.164	A31	A32	A33	A34	A35
0.197	A41	A42	A43	A44	A45
0.263	A51	A52	A53	A54	A55
0.328	A61	A62	A63	A64	A65

En la instalación experimental se mantuvieron constantes y de la misma dimensión los diámetros d_1 y d_2 de las dos secciones, en 25.4 mm, así como la presión del separador, el cual estaba abierto a la atmósfera.

Una bomba centrífuga y un compresor alternante garantizan el flujo de agua y el de aire; ambos flujos, son medidos antes de juntarse en un mezclador a la entrada del sistema, localizado en la parte superior del tramo inclinado. La presión de inyección del aire y del agua fue de 2 bar para garantizar flujo sónico, en el caso del aire, con lo cual se garantizaba la estabilidad del flujo de aire durante el experimento. Las presiones en las tuberías inclinada y vertical se miden por medio de transductores de presión; la fracción volumétrica se mide en dos puntos, uno en la sección inclinada y otro en la sección vertical, por medio de sondas conductivas de anillos; el separador de fases cuenta con un medidor de presión calibrado para poder medir el nivel de líquido acumulado (Fig. 2). Todos estos instrumentos, se calibraron y se conectaron a un sistema de adquisición de datos.

En la ejecución del experimento, primero se realizó un mapeo de la zona experimental para ubicar las condiciones que provocan el *slug* severo. Para esto, los experimentos se realizaron en una tubería de diámetro constante de 25.4 mm, con una inclinación respecto a la horizontal de $\theta = 30$ y una longitud del tramo inclinado de $L_1 = 4$ m. La longitud del tramo vertical es $L_2 = 3$ m. Los únicos parámetros que se variaron fueron las velocidades superficiales de las fases, U_{SG} y U_{SL} .

La Tabla 1 muestra la matriz con las condiciones experimentales que se probaron en este estudio, solo se muestra la variación de las velocidades superficiales para el ángulo de inclinación y las longitudes de las secciones constantes, que se indicaron en el párrafo anterior.

Se realizó un mapeo para todas las condiciones de operación estudiadas, para la geometría antes mencionada y solo se experimentó en las zonas donde ocurría el fenómeno *slug* severo.

4 Pruebas experimentales

4.1 Formación del *slug* severo en estado permanente

En el mapeo que se realizó, se cuidó que se reprodujeran las etapas típicas en la formación del flujo *slug* severo. En la Fig. 3, se pueden observar las 4 etapas características del *slug* severo, usando las señales de presión tanto en el tramo inclinado como en la parte baja del *riser*. Todas las condiciones de operación donde aparece el *slug* severo contienen estas cuatro etapas aunque para diferentes periodos de tiempo, dependiendo de las velocidades superficiales que se estén probando y la geometría del sistema. El *slug* severo empieza a formarse por la acumulación de agua en la parte inferior de la tubería vertical evitando que el gas continúe su paso y haciendo que aumente la presión de gas en la tubería inclinada (A), aunque la presión en la parte baja TP_2 sigue siendo ligeramente mayor. La región (B) muestra que la presión en el tramo inclinado es aún menor a la presión de la columna hidrostática, entonces el líquido fluye suavemente hacia el separador de fases. Cuando la presión del gas en el tramo inclinado iguala a la presión de la columna, entonces parte del gas se introduce al tramo vertical aligerando la columna y por lo tanto la desaloja violentamente (C). Posteriormente la presión en el tramo inclinado como en el fondo del vertical descienden y se igualan para iniciar un nuevo ciclo (D).

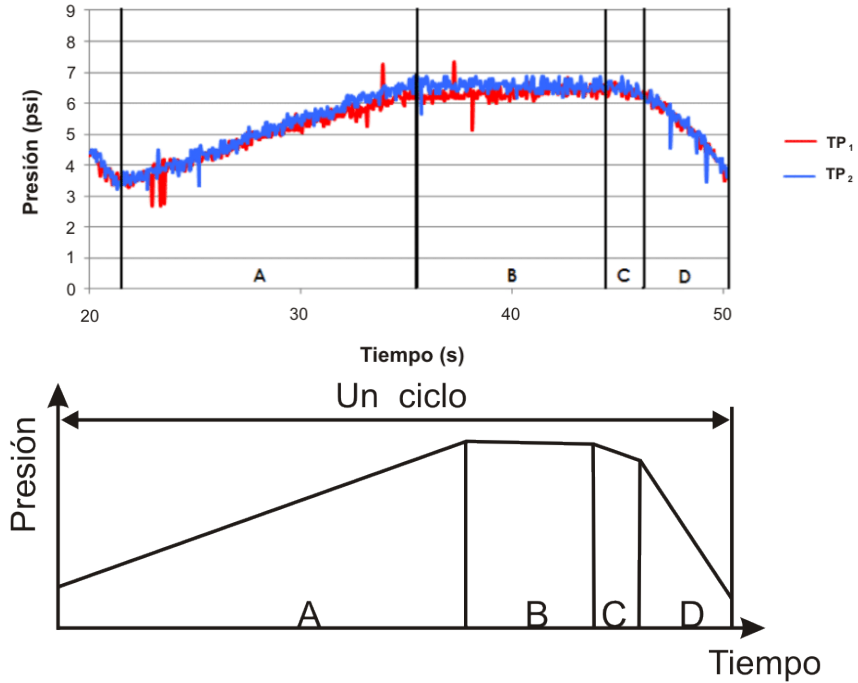


Fig. 3. Etapas de la formación de flujo *slug* severo, para las condiciones $U_{SL} = 0.099$ m/s y $U_{SG} = 0.171$ m/s usando dos señales de presión. Figura derecha, ciclo observado por Fabre y col. (1990).

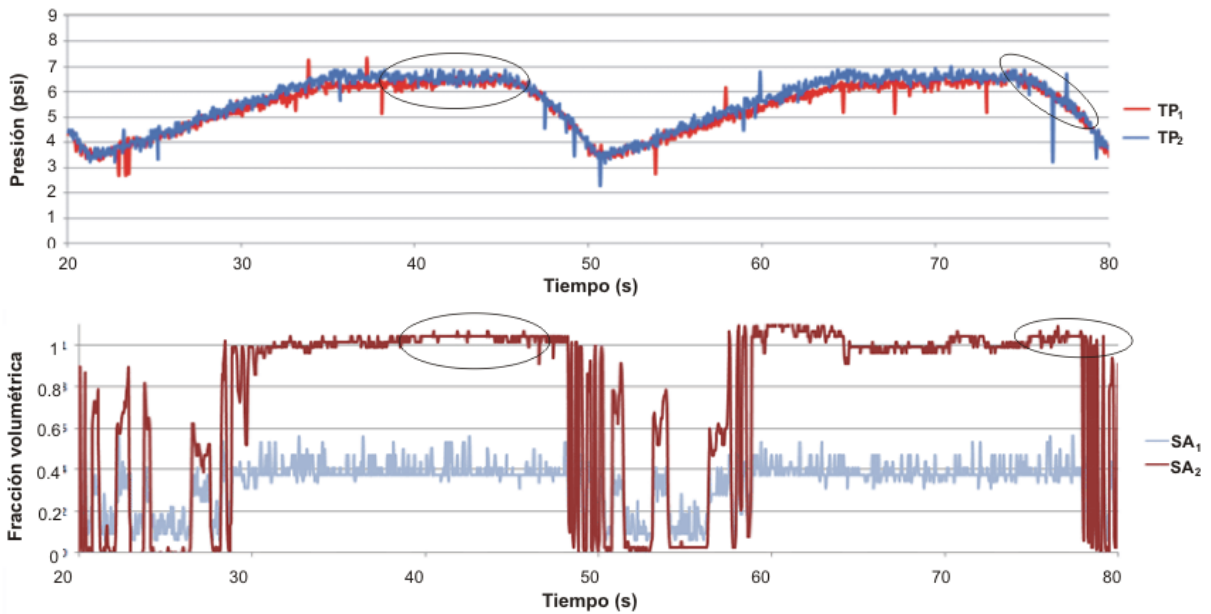


Fig. 4. Comportamiento de la presión y la fracción volumétrica del agua durante el flujo *slug* severo estable con las condiciones; $U_{SL} = 0.099$ m/s y $U_{SG} = 0.171$ m/s.

En la Fig. 4 se muestra el comportamiento de la fracción volumétrica de líquido y la presión para las condiciones, $U_{SL} = 0.099$ m/s, $U_{SG} = 0.171$ m/s. Se puede observar que durante el periodo A, la fracción volumétrica (SA_1) en el tramo inclinado es muy baja, pero oscila entre 0.1 y 0.4, debido a que se tiene un flujo estratificado, mientras que en el tramo vertical (SA_2) también es oscilante, entre 0 y 1.0, ya que toma en cuenta el líquido que desciende, esto también afecta a la fracción volumétrica en el tramo inclinado, ya que se tiene una señal también oscilante con la misma frecuencia. Sin embargo, cuando el nivel del líquido en el tramo vertical alcanza el punto donde se encuentra la sonda de anillos, SA_2 toma el valor de 1.0, aunque oscila un poco al inicio, indicando que en el tramo vertical solo hay agua.

Respecto a la presión, cuando se tiene el patrón de flujo batido (*churn*) (fracción volumétrica SA_2 es oscilante) las presiones son prácticamente iguales, sin embargo, cuando el nivel de líquido rebasa el punto donde se encuentra la sonda, la fracción volumétrica vale 1.0 (el tapón de líquido es estable) y la presión TP_2 es mayor que TP_1 .

Durante el periodo B ocurre que la columna se encuentra llena de líquido (SA_2 , fracción volumétrica

del líquido igual a 1.0) y la fracción volumétrica de la sección inclinada (SA_1) aumenta ligeramente, hasta 0.45 (oscila ligeramente de 0.4 a 0.45), pero se mantiene constante ya que el líquido sobrante, de la columna vertical, sale al separador en forma suave, hasta el instante en que se igualan las presiones.

Durante el periodo C, la presión TP_1 crece hasta primero igualar a TP_2 y se vuelve ligeramente mayor en un instante y provoca que, haya un desalojo violento del líquido de la columna, esta circunstancia hace también que la fracción volumétrica pase de un valor 1.0 (solo agua) a un valor correspondiente a un flujo batido oscilando la lectura de SA_2 de 0.10 a 1.0, mientras que la fracción volumétrica en el tramo inclinado (SA_1) oscila entre 0.1 y 0.35 por el mismo efecto, pero permanece en el patrón de flujo estratificado.

En el periodo D, se tiene un flujo pelicular descendente que es detectado por la sonda (SA_2), pero aún queda remanente un flujo batido pero de menor frecuencia, por esa razón se tiene ese tipo de señal (que oscila entre 0.0 y 0.9). En la sección inclinada se tiene un flujo estratificado ondulado que es detectado por la sonda SA_1 , cuya señal oscila entre 0.1 y 0.3. En esta condición, el ciclo dura 28 segundos.

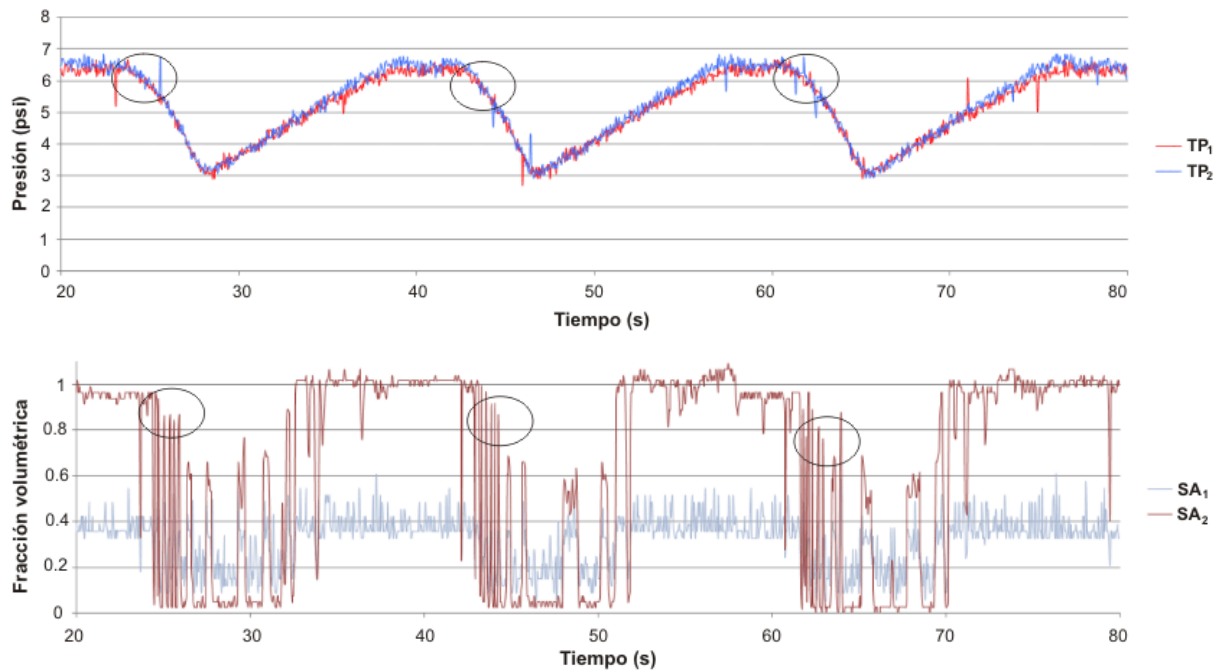


Fig. 5. Comportamiento de la presión y la fracción volumétrica del líquido para flujo *slug* severo estable a las condiciones $U_{SL} = 0.132$ m/s y $U_{SG} = 0.171$ m/s.

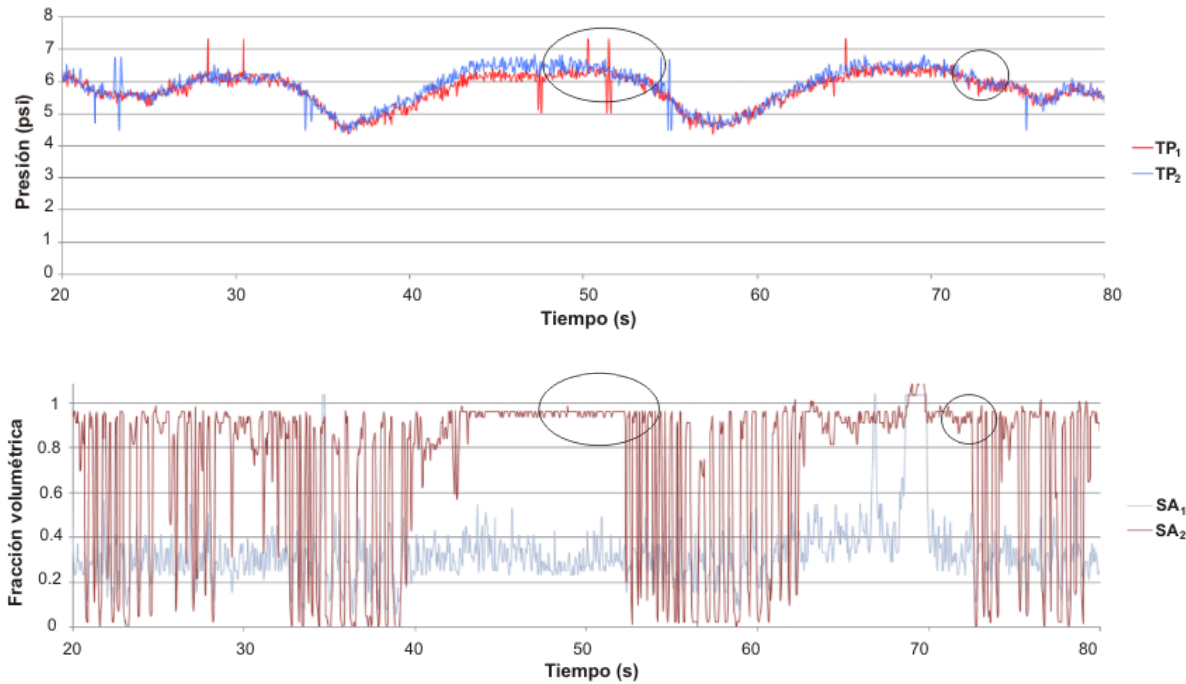


Fig. 6. Comportamiento de la presión y la fracción volumétrica del líquido para flujo *slug* severo inestable con las condiciones $U_{SL} = 0.164$ m/s y $U_{SG} = 0.118$ m/s.

A mayores velocidades superficiales del líquido, manteniendo constante la del gas, sin salirse del flujo estratificado en la sección inclinada, se obtienen resultados algo diferentes como era de esperarse. Por ejemplo, para la condición, $U_{SL} = 0.132$ m/s y $U_{SG} = 0.171$ m/s hay una mayor frecuencia de los tapones de líquido en la sección vertical, debido a que hay más líquido, y se repiten los cuatro pasos en la formación del *slug*. Sin embargo, los ciclos ocurren cada 18 segundos y la fracción volumétrica sigue el mismo comportamiento general, pero el flujo batido ocurre ligeramente más violento, ver Fig. 5.

4.2 Slug severo inestable

Aún cuando hay ciertas similitudes con el *slug* severo estable para las condiciones de flujo, $U_{SL} = 0.164$ m/s y $U_{SG} = 0.118$ m/s, durante la formación de los *slug*, pocas veces ocurren las etapas características del *slug* severo, pero cuando ocurren también provocan vibraciones violentas.

En la Fig. 6, se observa que las etapas del flujo *slug* severo ocurren solo cuando, primero la presión TP_2 es mayor que TP_1 (formación del tapón de líquido) y luego la TP_1 iguala a TP_2 (produciéndose

su desalojo), pero no de una manera cíclica estable por lo cual se considera que es un flujo *slug* severo esporádico, lo que hace que las vibraciones del sistema tengan frecuencias aleatorias, cuyos efectos pueden sumarse y también volverse peligrosos. Por ejemplo, en la Figura 6 se muestran dos desalojos de *slug* severo con poca duración seguidos de *slugs* con muchas burbujas que se confunden con el flujo batido de alta frecuencia. La característica del *slug* severo de los dos primeros es una pequeña diferencia de presión entre el tramo inclinado y la parte baja del *riser*, en el caso de los *slugs* con muchas burbujas en su cuerpo y el flujo batido es que ambas presiones son prácticamente iguales.

La Fig. 7 muestra una señal típica de flujo *slug* severo inestable para las condiciones: $U_{SL} = 0.023$ m/s y $U_{SG} = 0.022$ m/s. Al igual que en el caso anterior, hay presencia de flujo batido, y descargas esporádicas del tapón de líquido al separador. De acuerdo con las señales de presión, que oscilan de 3.5 a 7.0 psi, solo se forma el *slug* severo cuando la presión del tramo inclinado es menor que la del fondo del tramo vertical y lentamente lo iguala para que se dispare el *slug* severo al separador. La diferencia de presión entre estos dos puntos está

ligada proporcionalmente con la fracción volumétrica, cuando se tienen *slugs* con burbujas la presión en ambos puntos casi es la misma y cuando los *slugs* son prácticamente agua, la diferencia es mayor. Se debe mencionar que en el tramo inclinado siempre se mantuvo el flujo estratificado, aunque en algunos instantes alcanzaba la unidad indicando que hasta ese punto llegaba el nivel de agua, aunque las oscilaciones las hacia alrededor del valor de 0.45. Respecto al tramo vertical, la oscilación era de 0.0 a 0.9, y cuando llegaba a 1.0 y se mantenía, ocurría el *slug* severo.

Hay ciertas condiciones de flujo en las cuales no se presenta el *slug* severo, por ejemplo, para el caso cuando $U_{SL} = 0.263$ m/s y $U_{SG} = 0.171$ m/s. La Fig. 8 muestra la señal típica de este caso (*slug* normal), en la que se aprecia que la presión del tramo inclinado TP_1 siempre es menor que la presión de la columna bifásica del tramo vertical TP_2 ; TP_1 oscila de 0.35 a 6.0 psi, y TP_2 de 5 a 7 psi, pero siempre con una separación de 1 psi. La diferencia de presiones se debe a que en la columna vertical siempre se tenía un flujo de burbujas donde la fase continua era el agua.

Por otra parte, la fracción volumétrica en el tramo inclinado SA_1 oscila entre solo agua (1.0) y flujo estratificado (0.25). Por su parte, SA_2 detecta oscilaciones de fracción volumétrica del líquido entre 0.5 y 1.0, en el tramo vertical, como la

señal característica del flujo batido, aunque algunos instantes era burbujeante y esporádicamente había descargas de líquido y aire hacia el separador. Este comportamiento se debe a que hay una velocidad relativamente grande del líquido y baja en la fase gaseosa, aunque en la entrada al tramo inclinado se mantenga el flujo estratificado.

4.3 Otros patrones de flujo

Otras condiciones en las que no ocurre el flujo *slug* severo, es cuando la fase gaseosa fluye con mucha mayor velocidad que la fase líquida como en el caso; $U_{SL} = 0.099$ m/s, $U_{SG} = 0.276$ m/s. En la Fig. 9, se puede apreciar que la fracción volumétrica en el tramo inclinado se mantiene por debajo de 0.4 (SA_1 oscila entre 0.1 y 0.38) es decir se tiene flujo estratificado, mientras que en el tramo vertical se tiene básicamente la señal típica del flujo batido con descargas continuas de mezcla de mucho gas y poco líquido, hacia el separador. SA_2 oscila entre 0.05 y 0.9 pero siempre es mayor que SA_1 , la oscilación de la señal de SA_2 muestra que el patrón de flujo también oscila entre flujo batido y flujo burbujeante, parte del líquido va al separador y otra parte regresa a la parte baja del *riser* por lo que siempre hay una columna de líquido con burbujas en la sección vertical y la fase continua es el líquido.

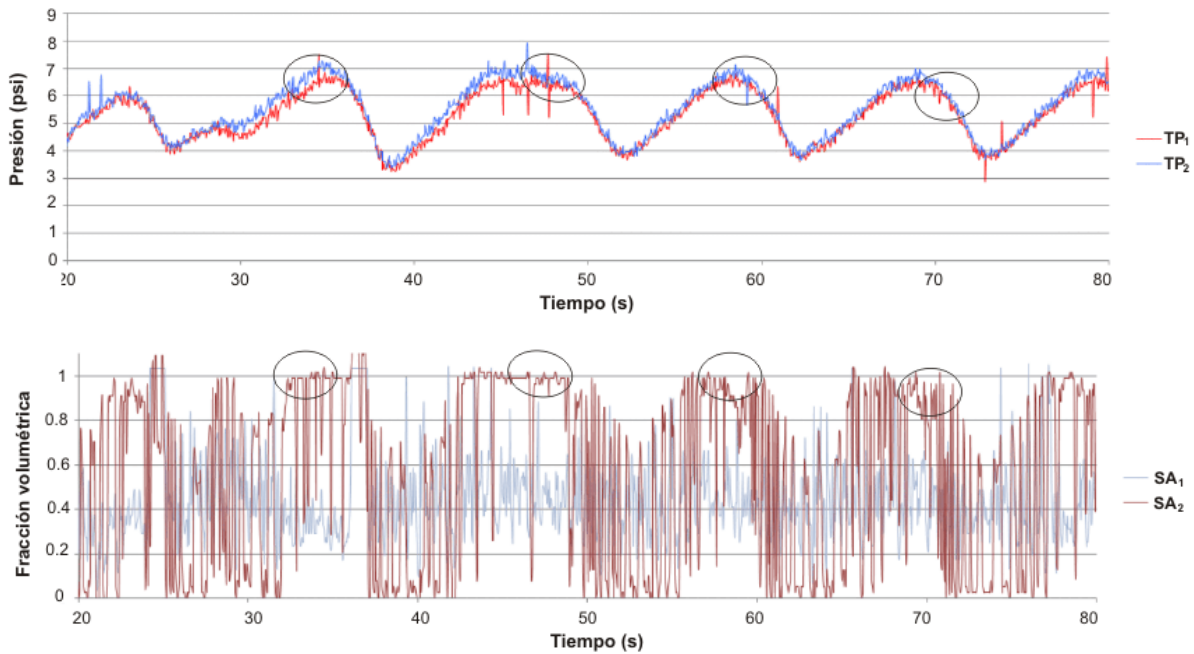


Fig. 7. Comportamiento de la presión y la fracción volumétrica del líquido para flujo *slug* severo inestable en las condiciones $U_{SL} = 0.023$ m/s y $U_{SG} = 0.022$ m/s.

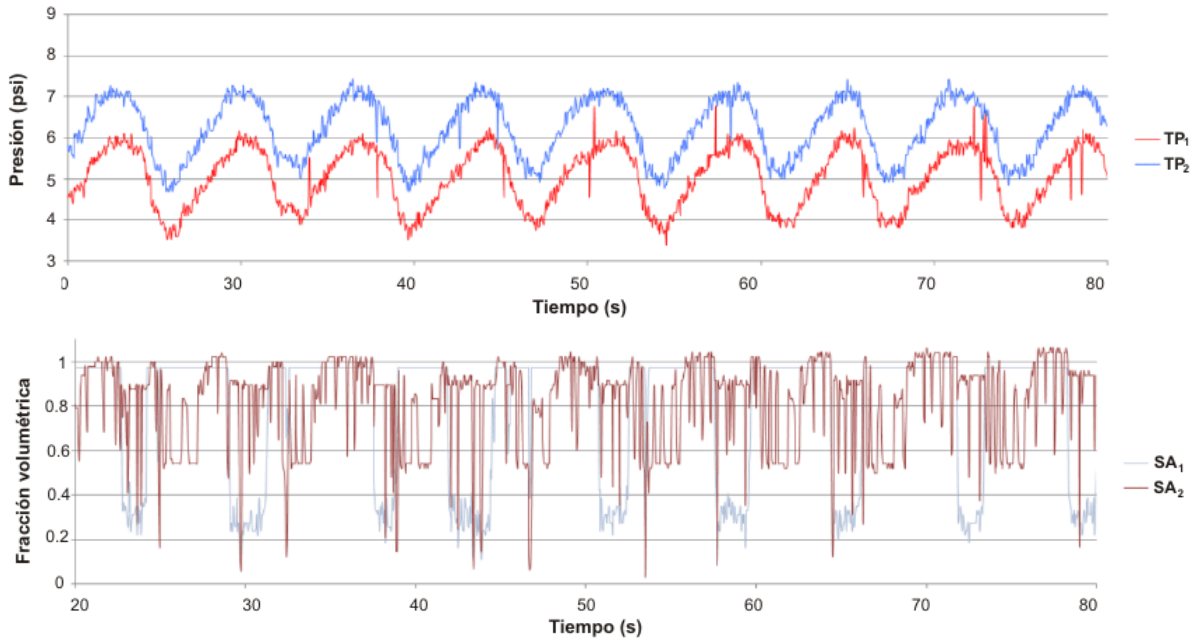


Fig. 8. Comportamiento de la presión y la fracción volumétrica del líquido para flujo *slug* normal para las condiciones; $U_{SL} = 0.263$ m/s y $U_{SG} = 0.171$ m/s.

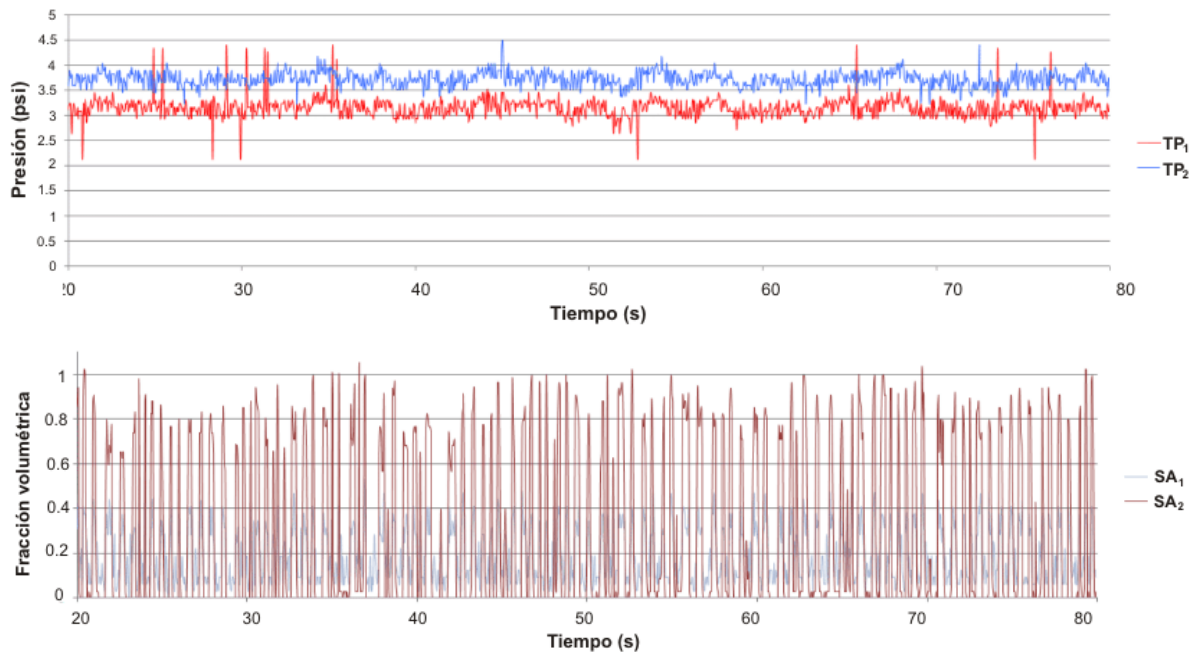


Fig. 9. Comportamiento de la presión y la fracción volumétrica del líquido para flujo batido (churn) con las condiciones; $U_{SL} = 0.099$ m/s, $U_{SG} = 0.276$ m/s.

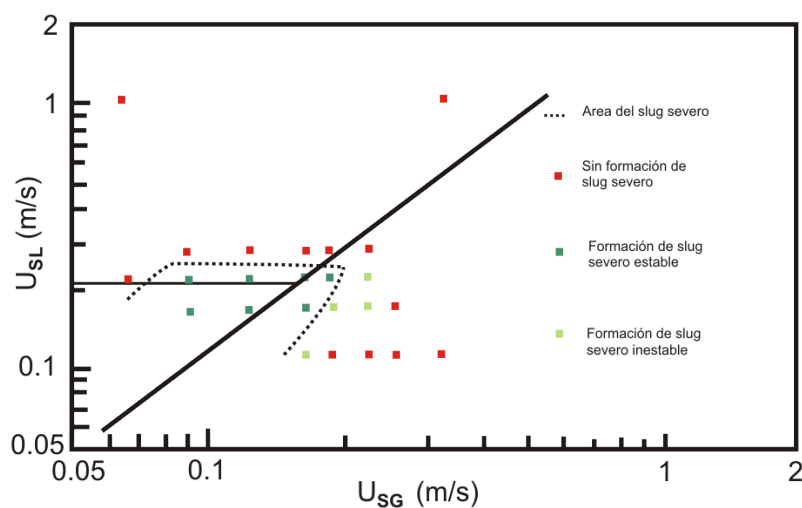


Fig. 10. Mapeo del *slug* severo para la geometría $L_1 = 4$ m, $L_2 = 3$ m y para un ángulo de inclinación de 30° . La línea azul horizontal es el criterio de Taitel (1986) y la inclinada de Boe (1981).

Por otra parte, la señal de presión en el tramo inclinado indica que siempre es menor que la de la parte baja del tramo vertical ($TP_1 < TP_2$) debido a que hay una columna hidrostática, además, hay picos esporádicos de la presión que representan vibraciones en el sistema, menos violentas que durante el *slug* severo.

Ahora bien, partiendo de la región de flujo *slug* severo, si se aumenta la velocidad del líquido, U_{SL} , se cae en el patrón de flujo burbujeante en la sección vertical, que es estable. Si se incrementa el flujo de gas, se cae en el patrón de flujo anular, de acuerdo con las observaciones de Barnea y col. (1985).

La Fig. 10 muestra los resultados del mapeo que se realizó previamente para ubicar la zona de ocurrencia del flujo *slug* severo en la instalación que se construyó y es donde se realizaron los experimentos ya comentados. El mapeo se llevó a cabo con los tramos inclinados y vertical con longitudes, $L_1 = 4.0$ m y $L_2 = 3.0$ m, para un ángulo de inclinación de 30° .

Conclusiones

El fenómeno denominado *slug* severo está influenciado por muchos parámetros propios del sistema tubería-flujo bifásico. Las velocidades superficiales, U_{SL} y U_{SG} , tienen una gran influencia

en las características del *slug* severo, así como de su aparición. En este estudio se investigó el efecto de la variación de U_{SL} y U_{SG} sobre el *slug* severo que se presenta en un sistema de tuberías inclinada-vertical, donde el primer tramo, estaba inclinado 30° respecto a la horizontal. Para varias combinaciones de velocidades superficiales de las fases, se midieron la fracción volumétrica tanto en la sección inclinada como la vertical, además la presión en el tramo inclinado y en la parte baja del tramo vertical. En base al análisis de los resultados experimentales obtenidos, se llegó a las siguientes conclusiones:

- Antes de la manifestación del *slug* severo, la presión en la parte baja del *riser*, TP_2 , es mayor que la presión en el tramo inclinado, TP_1 , debido a la columna hidrostática en este punto. Cuando la presión en la zona inclinada iguala a la presión en la parte baja del *riser*, se desaloja violentamente el agua del tramo vertical.
- Aunque la SA_2 detecte una fracción volumétrica igual a 1.0, no implica que este fluyendo agua al separador, significa que el nivel del agua ha llegado al punto donde está instalada.
- Después del desalojo del *slug* del tramo vertical, normalmente, se desarrolla un flujo *churn* o batido por lo que regresa parte del líquido a la parte inferior para iniciar un nuevo ciclo.

- Cuando las condiciones de flujo no son las que provocan el fenómeno de *slug* severo, hay una diferencia de presiones, pero es mayor la de la parte baja del *riser* y se mantiene siempre la diferencia, lo que significa que existe un flujo burbujeante en la parte vertical donde la fase continua es el líquido lo que hace que la presión siempre sea mayor.
- Mientras mayor sea U_{SG} o U_{SL} , manteniendo constante la velocidad que no se varía y sobre todo manteniendo condiciones de flujo estratificado en el tramo inclinado, la frecuencia del flujo *slug* severo es mayor, al tener una frecuencia mayor las inestabilidades en el sistema se manifiestan de forma violenta, ya que hay más vibraciones, tanto en la tubería como en el separador de fases.

Futuras investigaciones sobre el tema incluirán el estudio de la influencia de los parámetros geométricos en las características del fenómeno denominado *slug* severo.

Agradecimientos

Los autores agradecen al CONACyT y al Instituto Politécnico Nacional por el apoyo recibido para realizar esta investigación.

Referencias

- Adegboyega B. Ehinmowo, Ajibola T. Ogunbiyi, Oyinkepreye D. Orodu, D. S. Aribike and Adetokunbo O. Denloye, (2016). Experimental investigation of hydrodynamic slug flow in pipeline- riser systems. *International Journal of Applied Engineering Research* 11, 10794-10799.
- Andreussi, P. y Bendiksen, K.H. (1989). An investigation of void fraction in liquid slugs for horizontal and inclined gas-liquid pipe flow. *International Journal of Multiphase Flow* 15, 937-946.
- Baliño, J. L., Burr, K. P. y Lovate P. N. (2007). Modeling and simulation of severe slugging in pipeline-riser systems. 5-9 November. Brasilia, Brazil: *19th International Congress of Mechanical Engineering*.
- Barnea D., Shoham O., Taitel Y. y Dukler A. E. (1985). Gas-liquid flow in inclined tubes: Flow-pattern transitions for upward flow. *Chemical Engineering Science* 40, 131-136.
- Barnea D. (1987). A unified model for predicting flow pattern transitions for the whole range of pipe inclinations. *International Journal of Multiphase Flow* 13, 1-12.
- Bendiksen K., Malnes D. y Nuland S. (1982). Severe slugging in two-phase flow systems. *STATOIL-Den norske stats oljeselskap a.s.*, Norway.
- Boe A. (1981). Severe slugging characteristics, Part 1: Flow regime for severe slugging; Part 2: Point model simulation study. Trondheim, Norway: Selected Topics in Two-Phase Flow, *Norwegian Institute of Technology (NTH)*.
- Cruz M. J. A., López T. G., Sánchez S. F., Ramírez A. I. y Ramírez A. A. (2007). Caracterización hidrodinámica del flujo intermitente severo en sistemas de producción de hidrocarburos. *Científica* 11, 63-72.
- Fabre J., Peresson L. L., Corteville J., Bemicot M., y Ozon P. (1990). Severe slugging in pipeline/riser systems. *SPE Production Engineering* 5, 229-305.
- Farghaly M. A. (1987). Study of severe slugging in real offshore pipeline riser-pipe system. presentation 9587. Manama, Bahrain. *Proceedings - 5th Middle East Oil Show*.
- Gong J., Yang Z., Ma L., and Wang P. (2014). Severe slugging in air-water hybrid riser system. *Advances in Mechanical Engineering* 2014, Article ID 953213, pp. 1-10
- Henriot V., Duret E., Heintz E. y Courbot A. (2002). Multiphase production control: Application to slug flow. *Oil & Gas Science and Technology* 57, 87-98.
- Hill T.J. (1990). Gas injection at riser base solves slugging, flow problems. *Oil & Gas Journal* 26, 88-92.
- Issa R. (2009). Simulation of intermittent flow in multiphase oil and gas pipelines. 9-11 December. Melbourne, Australia: *Seventh International Conference on CFD in the Minerals and Process Industries*.

- Jahanshahi E., Skogestad S. and Helgesen A.H. (2012). Controllability analysis of severe slugging in well-pipeline-riser systems. Presentation 92583. May 31 - June 1. Trondheim, Norway. *Proceedings of the 2012 IFAC Workshop on Automatic Control in Offshore Oil and Gas Production*.
- Jansen F.E. and Shoham, O. (1994). Methods for eliminating pipeline-riser flow instabilities. Presentation 20292. 23-25 March. Long Beach California. *Proceedings of the 64th Annual Western Regional Meeting*.
- Jansen F.E., Shoham O. and Taitel Y. (1996). The elimination of severe slugging, experiments and modeling. *International Journal of Multiphase Flow* 22, 1055-1072.
- López T. G. (2006). Caracterización del flujo slug severo en tuberías verticales de producción de hidrocarburos (risers). Tesis de Maestría en Ciencias en Ingeniería Mecánica, Instituto Politécnico Nacional, México.
- Mayor T. S., Pinto A. M. F. R. and Campos J. B. L. M. (2007). Hydrodynamics of gas-liquid slug flow along vertical pipes in turbulent regime: a simulation study. *Chemical Engineering Research and Design* 85, 1497-1513.
- Ogazi A. I., Yi C., Liyun L. and Hoi Y. (2011). Production potential of severe slugging control systems. Presentation 86642. August 28 to September 2. Milano; Italy. *18th IFAC World Congress*.
- Pots B. F. M., Bromilow I. G. and Konijn M. J. (1985). Severe slug flow in offshore flowline/riser system. Presentation 6259. Manama, Bahrain. *Proceedings - 4th Middle East Oil Show*.
- Rejón T. J. R. (2011). Desarrollo de un dispositivo para la eliminación del fenómeno slug severo en un arreglo de tubería inclinada-vertical por el método de inyección de aire. Tesis de Maestría en Ciencias en Ingeniería Mecánica, Instituto Politécnico Nacional, México.
- Reza M., (2012), Severe slugging in gas-liquid two-phase pipe flow, Thesis Master of Science in Applied Earth Sciences, Delft University of Technology.
- Sánchez S. F., Cruz M. J. A., Carvajal M. I. and Saidani S. H. (2007). Hydrodynamic characterization of the severe slugging in hydrocarbon production vertical pipes. 1-4 July. Sun City, South Africa: *5th International Conference on Heat Transfer, Fluid Mechanics and Thermodynamics*.
- Sausen A., Sausen P. and De Campos M. (2012). The slug flow problem in oil industry and Pi level control. En: *New Technologies in the Oil and Gas Industry* (Salgado G. J., ed), pp. 103-118. INTECH Open Science.
- Schmidt Z., Brill J. P. and Beggs H. D. (1980). Experimental study of severe slugging in a two-phase flow pipeline-riser pipe system. *SPE Journal* 5, 407-414.
- Schmidt Z., Doty D. R. and Dutta Roy K. (1985). Severe slugging in offshore pipeline-riser pipe system. *SPE Journal* 25, 27-38.
- Solstad I.S. (2015). Small scale severe slugging experiments with several risers. Master in Science thesis, Norwegian University of Science and Technology, Department of Energy and Process Engineering.
- Taitel Y. (1986). Stability of severe slugging. *International Journal of Multiphase Flow* 12, 203-217.
- Taitel Y., Vierkand S., Shoham O. and Brill J. P. (1990). Severe slugging in a riser system: Experiments and modeling. *International Journal of Multiphase Flow* 16, 57-68.
- Wang L., Li Y., Liu C., Hu Q., Wang Y. and Wang Q. (2016). Modeling and experiments of severe slugging in a riser system. *Chinese Journal of Engineering* 2016, Article ID 4586853, 1-8.
- Xiaoming L., Limin H.E. and Huawei M.A. (2011). Flow pattern and pressure fluctuation of severe slugging in pipeline-riser system. *Chinese Journal of Chemical Engineering* 19, 26-32.
- Xing L., Yeung H., Shen J. and Cao Y. (2013). Experimental study on severe slugging mitigation by applying wavy pipes. *Chemical Engineering Research and Design* 91, 18-28.
- Xing L., Yeung H., Shen J. and Cao Y. (2013). A new flow conditioner for mitigating severe slugging in pipeline/riser system. *International Journal of Multiphase Flow* 51, 65-72.

Yasumasa Y., Yoshinori G. and Shigekatsu E. (2007).
Characteristics of a flow distribution of gas-
liquid slug flow in the long conduit. *Report of*

*the Research Institute of Industrial Technology,
Nihon University.*