

Análisis de las estadísticas del Flujo Bifásico Horizontal en Padrón de Pistón**Statistics Analysis to horizontal flow two-phase in slug pattern.****Análise das Estatísticas do fluxo Bifásico Horizontal em padron pistão**

Roberto Carlos Chucuya Huallpachoque¹, Ángela O. Nieckele².

Resumen

El flujo bifásico en patrón pistón es uno de los flujos que requiere mayor esfuerzo en su caracterización y modelaje, debido a sus características de distribución espacial de sus fases, que genera intermitencia al flujo. En el presente trabajo se estudia numéricamente el régimen pistón a lo largo de una tubería horizontal utilizando el Modelo de Dos Fluidos. Se realiza un análisis detallado de las estadísticas del flujo con la caracterización de los principales parámetros como longitud, velocidad frontal y posterior y la frecuencia de pasaje del pistón a lo largo de la tubería. Adicionalmente, se realizan comparaciones con datos de trabajos experimentales de la literatura con una muy buena concordancia, errores menores del 20%.

Palabras Clave: Modelo de Dos Fluidos, Pistones, Tubería Horizontal, Estadísticas.

Abstract

Slug flow is a two-phase flow pattern that requires large effort in its characterization and modeling, due to special characteristics of the phase's spatial distribution, which causes flow intermittency. This work presents a numerical study of the slug regime through horizontal pipes using the Two-Fluid Model. A detailed statistical analysis of the flow was carried out with characterization of main slug parameters, such as slug length, front and tail velocities and slug frequency along the pipeline. Further, comparisons with experimental data from the literature were performed, showing very good agreement, with lower error of 20%.

Keywords: Two-Fluid Model, Slug, Horizontal Pipe, Statistical

Resumo

O padrão de fluxo de duas fases é um dos fluxos de pistão que requer um maior esforço na caracterização e modelagem, devido às suas características de distribuição espacial das fases, o que gera um fluxo intermitente. Neste artigo estuda-se numericamente o pistão ao longo de um tubo horizontal utilizando o regime modelo de dois fluidos. Faz-se um análise detalhado da estatística de fluxo com a caracterização dos principais parâmetros como comprimento, frente e traseira e velocidade de frequência de passagem do pistão ao longo da tubulação. Além disso, as comparações são feitas com dados de trabalhos experimentais da literatura, com um acordo muito bom, tendo erros menos dos 20%.

Palavras-chave: Modelo de Dois Fluxos, Pistão, Tubulação Horizontal, Estatísticas.

Introducción

El consumo mundial de energía viene creciendo a ritmo acelerado, en ese sentido se vienen desarrollando nuevas y mejores tecnologías así como por fuentes alternativas que no impacten el medio ambiente. Hoy en día, la producción de petróleo y gas natural envuelve el transporte de fluidos en fases líquidas (óleo y gas) y gaseosa – eventualmente con arena dispersa – hasta la unidad de procesamiento donde se realizara la separación de las fases. El estudio de este tipo de fenómeno tan complejo es de crucial importancia para la proyección de tuberías y equipos, así como en la optimización de los procesos ligados a la extracción y transporte de petróleo y gas.

¹Escuela de Ingeniería Industrial. Universidad César Vallejo, Chimbote-Perú, roberto_chucuya@yahoo.es

² Departamento Engenharia Mecânica, PUC/Rio, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, email: nieckele@puc-rio.br,

Recibido: 03 de junio de 2016

Aceptado: 28 de junio de 2016

En los últimos años las operaciones de producción offshore se están expandiendo para profundidades cada vez mayores, tornando los costos asociados aún más elevados y haciendo imprescindibles estudios detallados de viabilización y optimación de los equipos y procesos relacionados. En el Perú la producción offshore está a cargo de la empresa de petróleos de Colombia, Ecopetrol, que en asocio con la compañía nacional de petróleo de Corea (Korea National Oil Corporation - Knoc), cerró la compra de la empresa Offshore International Group Inc., con sede en Estados Unidos, y cuyo principal activo es Petro-Tech Peruana S.A, el cual está dedicada a la exploración, desarrollo, producción y procesamiento de hidrocarburos en Perú.

En relación al gas, el Perú consta con una planta aún en construcción, la cual tendrá dos tanques de GNL con capacidad de 110.000 m³, la duración proyectada de esta planta es de 30 años y el objetivo principal es exportar entre 15 o 20 millones de metros cúbicos diarios de GN. La inversión estimada para la instalación de esta planta de GNL y el terminal marino es de aproximadamente US\$ 2 billones. (Sociedad Nacional de Minería, Petróleo y Energía del Perú, 2005).

La importancia de prever los flujos multifásicos en tuberías de petróleo y gas es vital y al mismo tiempo una tarea extremadamente complicada, especialmente debido a la compleja interacción entre las fases que fluyen. La descripción rigurosa del fenómeno requiere de esfuerzos muy grandes en cuanto a la solución de los modelos matemáticos y las diferentes alternativas de solución.

La investigación por pertenecer al campo energético aportara con el desarrollo y desenvolvimiento tecnológico actual, no solo en el ámbito nacional sino internacional.

Los resultados de la investigación proporcionarían un conocimiento mayor de los flujos bifásicos, específicamente del patrón slug. Adicionalmente, por tratarse de un trabajo numérico incrementaría el conocimiento en cuanto al modelaje y simulación, de este complejo y amplio campo de investigación que en la actualidad se ha tornado importante en diversos campos de la ingeniería y física, y esta aun en crecimiento.

La expresión flujo multifásico está relacionado al flujo simultáneo de diferentes fluidos, consistente en más de una fase (sólido, líquido o gas) de la misma sustancia o de diferentes fluidos. Las diferentes fases pueden ser de la misma sustancia, como un líquido y su vapor, o de diferentes sustancias, como un líquido y un gas o de dos líquidos o cualquier combinación de líquido, gas y sólido.

La aplicación de flujos multifásicos en tuberías verticales, horizontales e inclinadas es muy común en diversas actividades industriales, entre las cuales destacan la industria de petróleo y gas, la industria de generación de energía (nuclear) y la industria química. Consecuentemente, el estudio de flujos multifásicos constituye un área de investigación que despierta gran interés en diversas ramas de la ciencia.

Los primeros intentos para clasificar los patrones de flujos, generalmente eran basados en la observación visual directa del experimentalista, el cual montaba y operaba un circuito de flujo bifásico, generalmente con agua y aire, visualizaba directamente el fenómeno o tomaba fotografías del mismo para una observación posterior, y clasificaba los patrones de flujos. Las fases de un flujo multifásico se puede configurar de diversas formas, dando origen a diferentes patrones de flujos con diversas características. La Figura 1 ilustra posibles configuraciones de las fases. Para el caso de flujo horizontal tenemos: estratificado y estratificado ondulado ("*stratified flow*" e "*wavy-stratified flow*"), burbuja alargada ("*elongated bubble flow*"), flujo pistón ("*slug flow*"), anular y anular ondulado ("*annular flow*" e "*wavy-annular flow*") y burbujas de gas dispersas ("*dispersed bubble flow*" o "*bubbly flow*"). Para el caso de flujo vertical, son encontrados el patrón de burbujas dispersas y los patrones intermitentes como pistón y el patrón caótico ("*churn flow*"), así como el patrón anular [1-2].

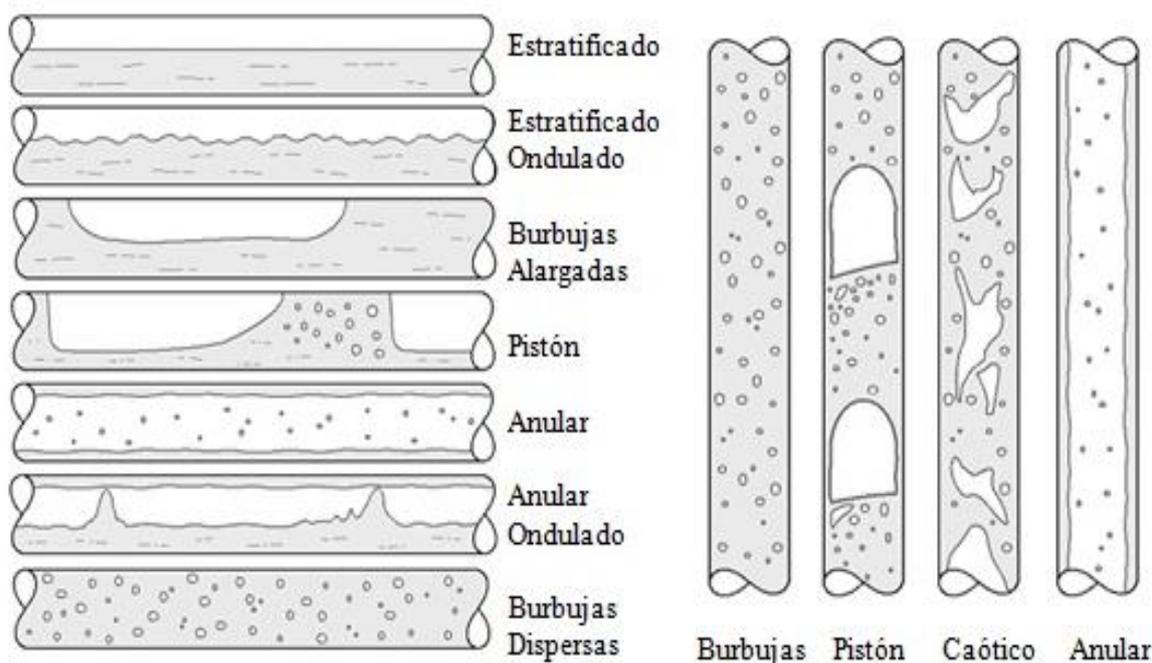


Figura 1.- Patrones de flujo para flujos horizontal y vertical.

Entre los diversos regímenes de flujos bifásicos, el patrón pistón (*slug*) se destaca por ser uno de los que requiere mayor esfuerzo en su caracterización y modelaje, debido a las características marcadas de distribución espacial entre las fases, que genera intermitencia al flujo. Este flujo ocurre en un amplio rango de caudal de gas y líquido en tuberías de diámetro medio y pequeño, con variación periódica de la densidad, fracción de vacío y presiones en la sección transversal de la tubería.

El flujo en patrón pistón intermitente, poseyendo una naturaleza estocástica, pues la distribución espacial de las fases induce intermitencia local en la sección transversal de la tubería lo cual lleva a una variación temporal de los parámetros del flujo. Con mucha frecuencia se realiza una descripción física simplificada en términos de los valores medios de longitud, velocidad y frecuencia del pistón (Barnea y Taitel, 1995). A pesar de eso existen casos en que las informaciones sobre los valores medios no son suficientes, siendo importante conocer datos referentes a la distribución de las variables y el máximo valor posible alcanzado, como por ejemplo de la longitud del pistón líquido, que es una información esencial en el diseño de separadores gas-líquido (Taitel, 1994)

Este patrón de flujo es formado por una sucesión de pistones líquidos separado por burbujas de gas fluyendo sobre una película de líquido. Esta secuencia representa la configuración básica del flujo intermitente. La unidad básica del pistón consiste en una región de pistón líquido de longitud L_s y una región de película de líquido de longitud $L = L_s + L_f$. El frente del pistón líquido tiene una velocidad U_T y la parte posterior de esta (o nariz de la burbuja) posee una velocidad U_B , como se muestra en la Figura 3. La región donde se concentra una mezcla de gas y líquido posee una velocidad U_M , que es igual a la suma de la velocidad superficial del gas, U_{SG} , con la velocidad superficial del líquido, U_{SL} .

En tuberías horizontales el flujo en patrón pistón puede ocurrir a partir del régimen de flujo estratificado, debido al aumento de la velocidad del gas. Las inestabilidades generan ondulaciones en la interface entre las fases, pudiendo generar ondas que pasan a ocupar, en algunos casos, toda la sección transversal de la tubería formando pistones, que son rápidamente transportados dentro de la tubería, formándose una sucesión de pistones líquidos cargando pequeñas burbujas de gas dispersas y grandes burbujas de gas. El régimen de pistón, en flujos vertical, es normalmente simétrico en relación a la línea de centro de la tubería. Aumentando la velocidad de la fase gaseosa, las pequeñas burbujas tienden a aglomerarse y el diámetro de esta nueva burbuja adquiere una dimensión similar a la de la tubería. Cuando esto ocurre, se forman burbujas grandes, denominadas burbuja de Taylor.

Entre las burbujas de Taylor y la pared de la tubería fluye un fino filme de líquido hacia abajo. Figura 2.

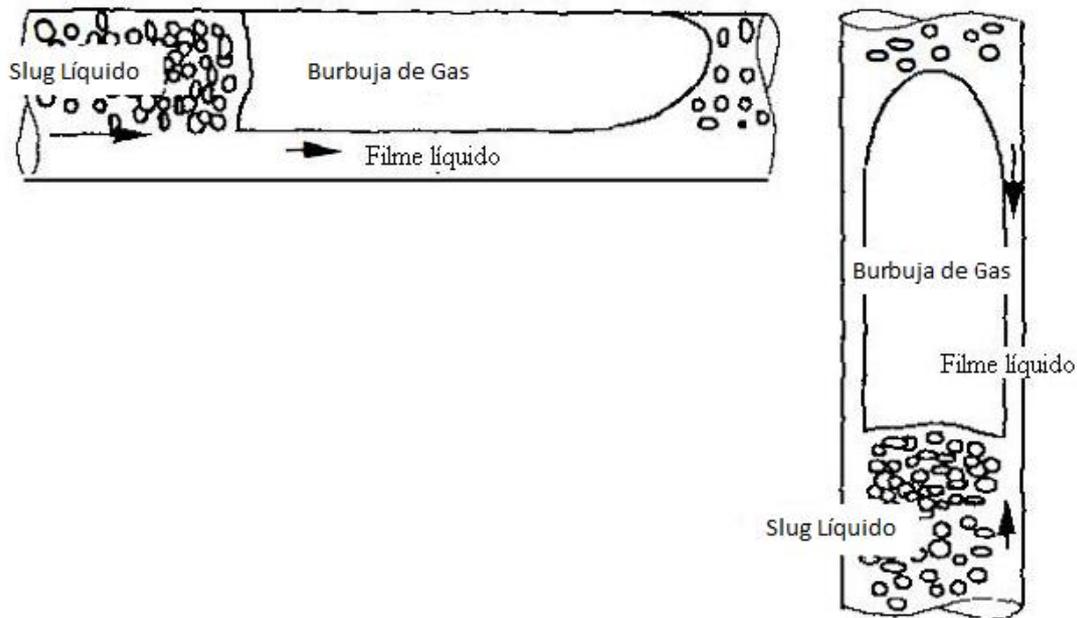


Figura 2 – Flujo en Patrón Piston (Slug) en Tuberías Horizontal y Vertical.

Diversos estudios numéricos y experimentales pueden ser encontrados en la literatura tratando de analizar las variables estadísticas asociadas con este tipo de padrón [3-5]. Las correlaciones y observaciones experimentales para las principales propiedades de los pistones son extremadamente importantes para validar los resultados obtenidos numéricamente. De un modo general, los modelos desarrollados son limitados para algunas características particulares, como el tipo de fluido, dimensiones de la tubería, etc.

En el presente trabajo, se determinó numéricamente con el Modelo de Dos Fluidos, el flujo bifásico aire- agua en el padrón pistón, en una tubería horizontal.

Se comparó los principales parámetros que caracterizan los pistones como su longitud, velocidad de traslación y frecuencia para un régimen estadísticamente permanente con medidas experimentales de estadísticas turbulentas, obteniéndose buena concordancia.

Modelamiento Matemático

Este patrón de flujo es formado por una sucesión de pistones líquidos separado por burbujas de gas fluyendo sobre una película de líquido. Esta secuencia representa la configuración básica del flujo intermitente. La unidad básica del pistón, consiste en una región de pistón líquido de longitud L_s y una región de película de líquido de longitud $L = L_s + L_f$. El frente del pistón líquido tiene una velocidad U_T y la parte posterior de esta (o nariz de la burbuja) posee una velocidad U_B , como se muestra en la Figura 2. La región donde se concentra una mezcla de gas y líquido posee una velocidad U_M , que es igual a la suma de la velocidad superficial del gas, U_{SG} , con la velocidad superficial del líquido, U_{SL} , las cuales son definidas de acuerdo con:

$$U_{sG} = \alpha_G U_G \quad ; \quad U_{sL} = \alpha_L U_L \quad (1)$$

donde α representa la fracción de la fase, U la velocidad de la fase y los índices G y L se refieren a las fase gas y líquida, respectivamente.

El Modelo de Dos Fluidos consiste en un conjunto de ecuaciones de conservación para cada fase [6]. En el presente trabajo, se consideró una formulación unidimensional, siendo las ecuaciones del

modelo obtenidas a través de un proceso de medias en la sección transversal del flujo. Se consideró el flujo como isotérmico a lo largo de la tubería horizontal, sin transferencia de masa entre las fases, además la presión es uniforme en la sección e igual para las dos fases.

De acuerdo con estudios anteriores [7-8] se consideró que la presión del gas es igual a la presión en la interface, siendo esta igual en ambos lados de la interface. La fase líquida se modelo como incompresible, mientras que la fase gaseosa sigue la ley de los gases ideales.

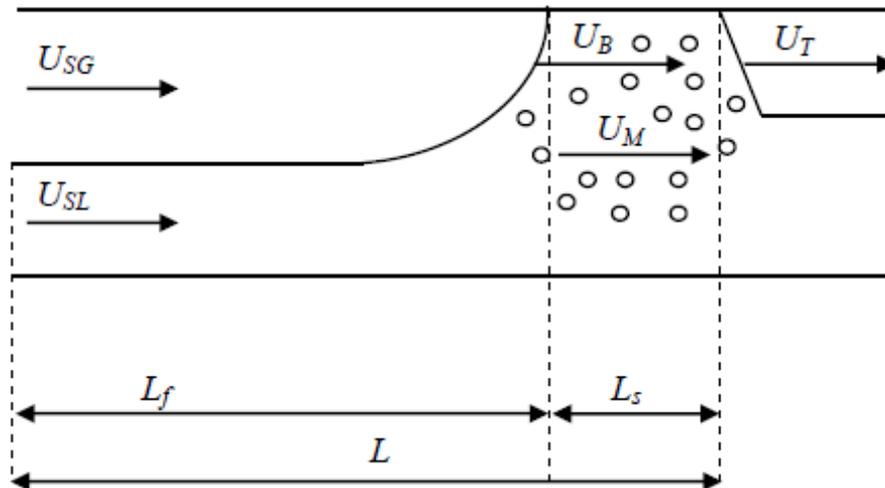


Figura 3.- Célula unitaria de un pistón.

Las fracciones volumétricas del líquido y del gas están relacionadas entre sí, y considerando que la razón de volúmenes puede ser considerada igual a razón de áreas, se tiene:

$$\alpha_L + \alpha_G = 1, \quad \text{con} \quad \alpha_L = \frac{A_L}{A}; \quad \alpha_G = \frac{A_G}{A} \quad (2)$$

Las ecuaciones de conservación de masa de cada fase son:

$$\frac{\partial(\rho_G \alpha_G)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho_G \alpha_G U_G)}{\partial x} = 0 \quad (3)$$

$$\frac{\partial(\rho_L \alpha_L)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho_L \alpha_L U_L)}{\partial x} = 0 \quad (4)$$

Las ecuaciones de conservación de cantidad de movimiento lineal son:

$$\frac{\partial(\rho_G \alpha_G U_G)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho_G \alpha_G U_G^2)}{\partial x} = -\alpha_G \frac{\partial p}{\partial x} - \alpha_G \rho_G g \frac{\partial h_L}{\partial x} \cos \beta - \alpha_G \rho_G g \sin \beta - \frac{\tau_{wG} S_G}{A} - \frac{\tau_i S_i}{A} \quad (5)$$

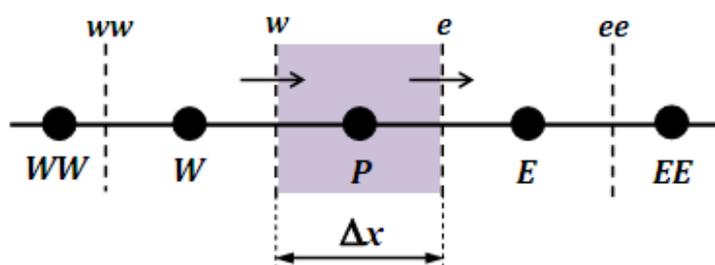
$$\frac{\partial(\rho_L \alpha_L U_L)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho_L \alpha_L U_L^2)}{\partial x} = -\alpha_L \frac{\partial p}{\partial x} - \alpha_L \rho_L g \frac{\partial h_L}{\partial x} \cos \beta - \alpha_L \rho_L g \sin \beta - \frac{\tau_{wL} S_L}{A} + \frac{\tau_i S_i}{A} \quad (6)$$

donde los subíndices L y G representan las fases líquida y gaseosa, mientras que x y t son las coordenadas espacial y temporal, respectivamente. ρ , U y α son, en esa orden, la masa específica, la velocidad y fracción volumétrica de cada fase; τ es la tensión de cizallamiento, g y β son la aceleración de la gravedad y la inclinación de la tubería con la horizontal. p es la presión media del gas. A es el área de la sección transversal y S_L , S_G y S_i son los perímetros mojados del líquido, del gas

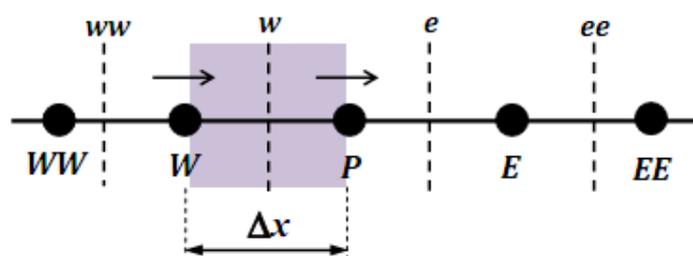
y de la interface, y τ_{wL} , τ_{wG} , τ_i representan las tensiones de cizallamientos líquido-pared, pared-gas y líquido-gas, respectivamente.

Método Numérico

Las ecuaciones de conservación fueron discretizadas utilizando el método de los Volúmenes Finitos, el cual consiste en integrar las ecuaciones en cada volumen de control. Se utilizó una malla desfasada para las velocidades en relación a las otras variables escalares (fracciones volumétricas, masas específicas y presión), como ilustrado en la Fig. 4.



(a) Fracción volumétrica y presión



(b) velocidades.

Figura 4 – Volúmenes de control. (a) fracción volumétrica y presión (b) velocidades.

La fracción volumétrica del gas se obtiene a partir de la solución de la ecuación de conservación de masa de la fase gaseosa. Las velocidades de la fase líquida y gaseosa son obtenidas de la solución de las respectivas ecuaciones de cantidad de movimiento lineal. La presión es obtenida para el volumen de control principal, a partir de la ecuación de conservación de masa de la mezcla. Esta ecuación es obtenida combinando las ecuaciones de continuidad del líquido y gas, las cuales son ponderadas por las masas específicas de referencia de las respectivas fases.

Formación del Pistón

Una situación crítica de la metodología surge cuando existe la formación del pistón, pues la fracción volumétrica del gas tiende a cero, y la ecuación de cantidad de movimiento para el gas se torna singular, debido a que este parámetro multiplica ambos lados de la ecuación, esto torna posible el surgimiento de valores anormalmente altos de velocidad del gas en la formación del pistón. Para la solución de este problema se recomiendan que el surgimiento del pistón en la tubería sea monitoreado a través de la fracción volumétrica del gas en las fases del volumen de control principal, donde las velocidades son resueltas, cuando $\tilde{\alpha}_G < 0,02$ (formación del pistón) la velocidad del gas debe ser especificada igual a cero.

Cálculo de los Parámetros Medios del Pistón

Para la determinación de los parámetros medios del pistón es necesario obtener un régimen estadísticamente permanente. Solamente después de observar que este régimen es alcanzado las variables de interés son monitoreadas y almacenadas para la determinación de las medias de interés. Las propiedades del pistón como longitud, velocidad frontal y posterior y la frecuencia son medidas numéricamente en cinco posiciones fijas a lo largo de la tubería. Para cada posición se obtiene resultados los cuales son evaluados en términos de las medias de estos parámetros.

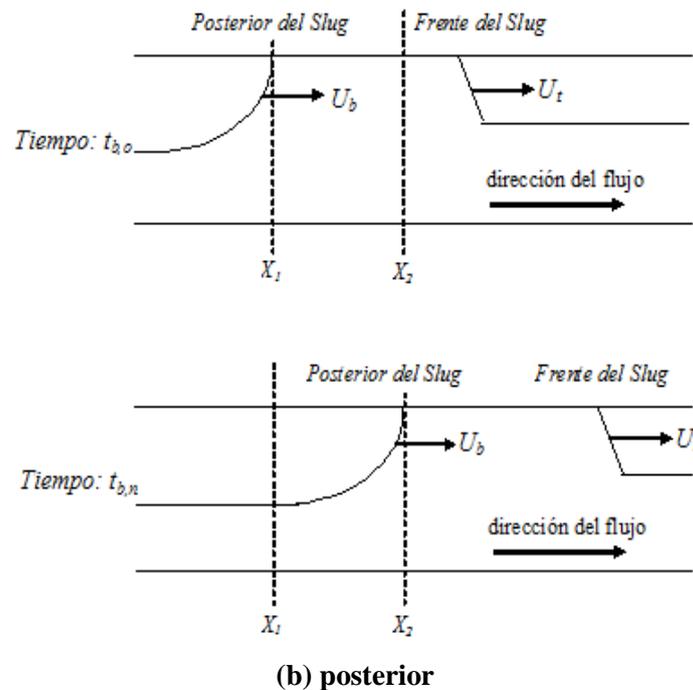
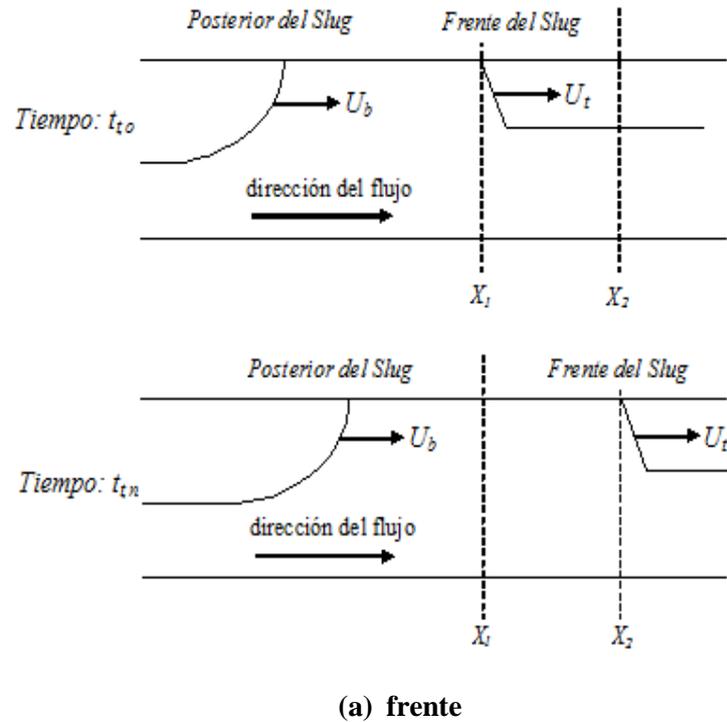


Figura 5 – Medición de la velocidad de cada Pistón. (a) frente (b) posterior.

Aparato experimental

La Figura 6 muestra esquemáticamente la sección de prueba construida para realizar los experimentos. Una tubería de acrílico con 24 mm de diámetro y 10 m de longitud fue montada en una estructura rígida de acero. La longitud de la tubería fue definida de forma de garantizar la formación de pistones estables. El agua fue bombeada desde un reservorio a través de un circuito cerrado. El aire fue introducido a través de un ventilador centrífugo. Se instalaron instrumentos para medir los flujos de agua y aire, los cuales se mezclaron en una junta en Y posicionada en la entrada de la tubería a acrílica. Después de pasar por la sección de prueba, la mezcla bifásica retorna al reservorio, donde las fase son separadas con la ayuda de una entrada tangencial. La Figura 5 muestra la sección de prueba, indicando las trayectorias de los flujos del agua y aire. Las variables estadísticas fueron determinadas con fotocélulas instaladas en posiciones predefinidas [5], con un procedimiento análogo al empleado en las mediciones numéricas.

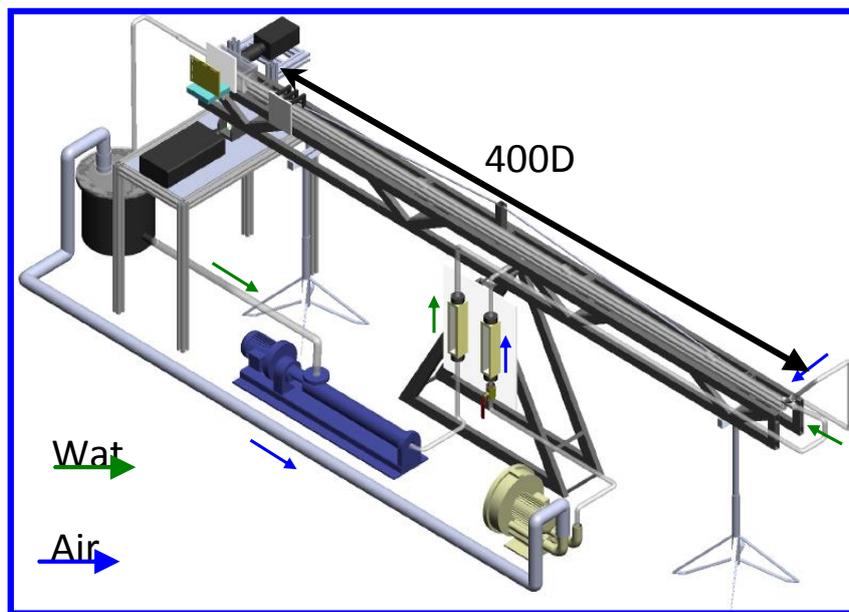


Figura 6 – Aparato experimental

Materiales y método

El presente estudio del “Análisis de las Estadísticas del Flujo Bifásico Horizontal en Padrón de Pistón (Slug)”, Es una investigación de diseño pre experimental, a un grupo se aplica una prueba previa al estímulo o tratamiento, luego se aplica el estímulo y al final se aplica otra prueba. El mismo grupo es tomado para comparar los efectos.. Por otro lado, es longitudinal porque lo que se buscó fue evaluar las variables en el tiempo recogiendo información con respecto a la longitud de formación del pistón, velocidad de traslación del frente y posterior del pistón y la frecuencia de la formación de este tipo de patrón en tuberías horizontales que fueron motivo del estudio. De acuerdo al fin que persiguió, la presente investigación es aplicada debido a que su propósito fue proponer soluciones a problemas identificados en el área de transporte de fluidos en tuberías. De acuerdo al régimen de investigación es Orientada ya que el presente trabajo de tesis fue guiado por un asesor especialista en el área para su correcto desarrollo, siendo el diseño del estudio es pre experimental.

Para este estudio, se consideró a la población total que está constituida por todos los valores obtenidos de longitud, velocidad y frecuencia obtenidas en la simulación para diversos regímenes de velocidades superficiales. Para la muestra se asumió que la población es igual a la muestra ($N = n$).

Resultados

Fueron seleccionados tres casos los cuales son caracterizados por diferentes velocidades superficiales del líquido $U_{SL} = 0,295$ m/s (caso1); $U_{SL} = 0,393$ m/s (caso 2) e $U_{SL} = 0,516$ m/s (caso 3), para una velocidad superficial del gas ($U_{SG} = 0,788$ m/s). Las variables estadísticas del pistón (longitud, velocidad y frecuencia) fueron determinadas numéricamente, en diversas posiciones a lo largo del canal, solamente después de la obtención del régimen estadísticamente permanente. Experimentalmente, estos valores fueron determinados solamente en una coordenada igual a $x=9$ m y fueron comparados con los valores numéricos.

Frecuencia del Pistón

La Figura 7 presenta el inverso del intervalo de tiempo entre pistones, determinado en una posición axial fija, $x=9$ m, para el Caso 2. Esta figura muestra el carácter intermitente del flujo e indica que el régimen estadísticamente permanente fue obtenido.

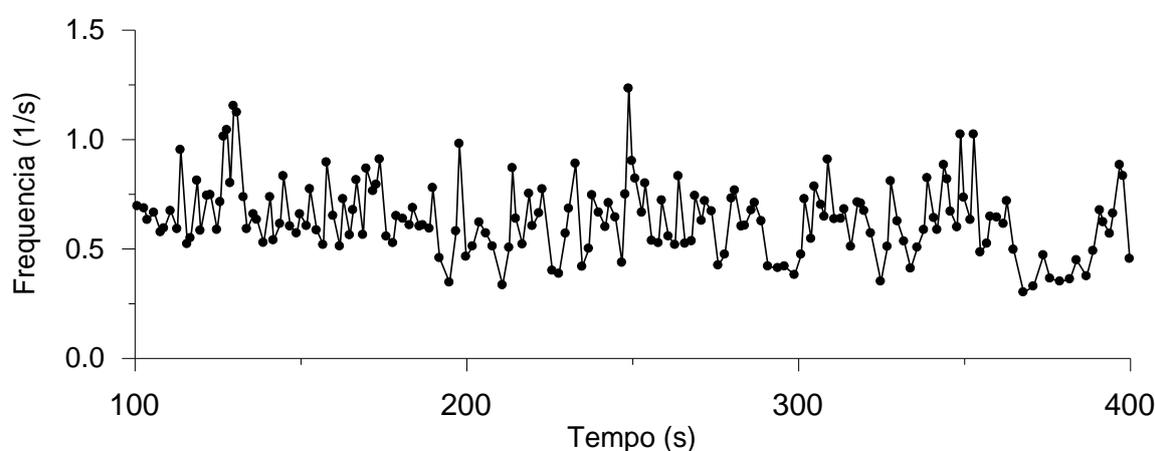
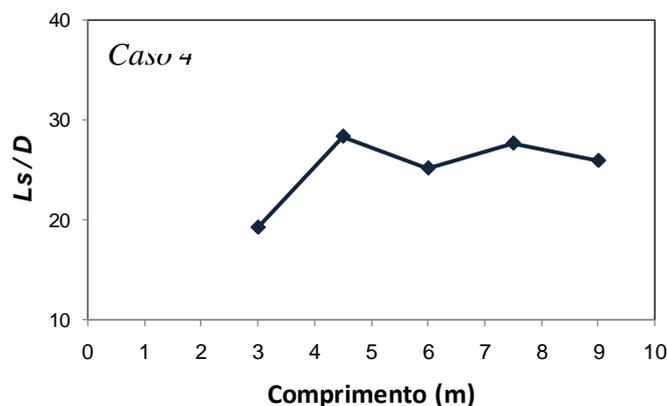


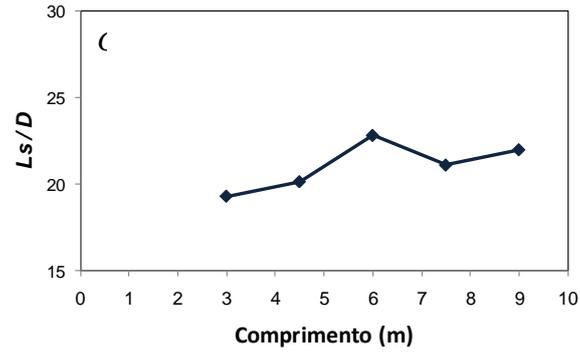
Figura 7- Frecuencia en el tiempo en $X=9$ m. Caso 2. $U_{SL}=0,393$ m/s.

Longitud de los Pistones

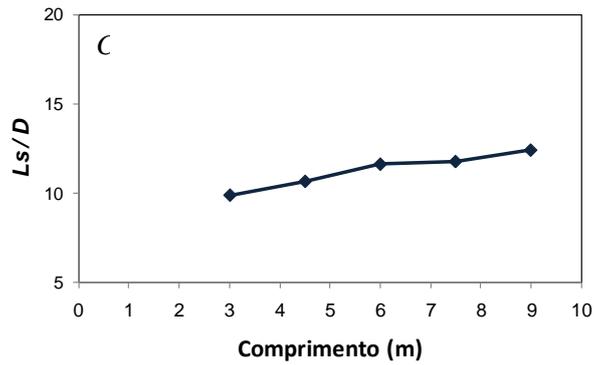
La evolución de la longitud media de los pistones a lo largo de la tubería es mostrada en la Figura 8 para los tres casos. El Caso 1 inicialmente presenta un rápido crecimiento hasta que a partir de una distancia de 5m de la entrada de la tubería ya no se observa grandes variaciones de la longitud, el pistón se aproxima a una longitud constante de $L_s/D \sim 25$. Los otros casos presentan un comportamiento semejante, pero el crecimiento inicial es más suave. Este resultado indica que los procesos de crecimiento de los pistones ocurren principalmente en la región de entrada de la tubería.



(a) Caso 1: $U_{SL} = 0,295$ m/s



(b) Caso 2: $U_{SL} = 0,393$ m/s



(c) Caso 3: $U_{SL} = 0,516$ m/s

Figura 8- Evolución de la longitud media de los pistones

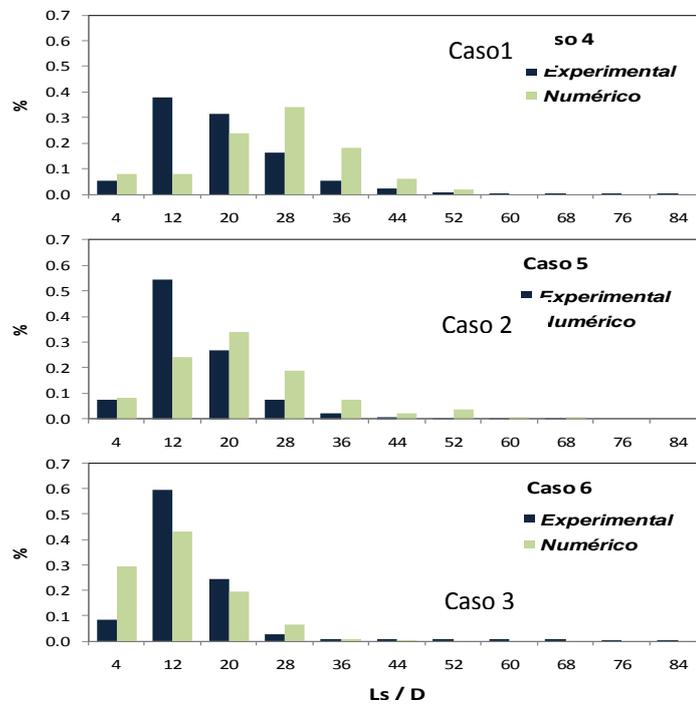


Figura 9- Distribución de la longitud media de los pistones experimentales y numéricos.

La Figura 9 presenta los histogramas obtenidos experimentalmente y numéricamente para las longitudes de los pistones para los tres casos. Los histogramas presentan la razón entre el número de pistones con una determinada longitud por el número total de pistones identificadas durante el periodo de adquisición de los datos. Los resultados corresponden a $x=9m$, una vez que solamente para esta posición los datos experimentales fueron medidos. Obsérvese claramente el carácter aleatorio del flujo, con una gran gama de longitudes, concordando con la literatura [9]. La distribución prevista numéricamente presenta un rango mayor de longitudes, aun así los resultados pueden ser considerados satisfactorios.

Velocidad de traslación de los Pistones

Nicklin [10] propusieron la siguiente correlación para evaluar la velocidad de traslación de la burbuja alargada (o parte posterior del pistón):

$$U_t = C_o U_M + U_d \quad (7)$$

donde U_d es la velocidad de deslizamiento y U_M es la velocidad de mezcla. Bendiksen [11], utilizando una base de datos experimentales para diversos caudales, estimó el valor de C_o y la velocidad de deslizamiento U_d en función del número de Froude $Fr_M = U_M / (g D)^{0.5}$, siendo el Froude crítico $Fr_c = 3,5$.

$$\begin{aligned} Fr_M > Fr_{crit} &\Rightarrow C_o = 1,20, \quad U_d = 0 \\ Fr_M \leq Fr_{crit} &\Rightarrow C_o = 1,05, \quad U_d = 0,54\sqrt{gD} \end{aligned} \quad (8)$$

Para todos los casos analizados, el número de Froude basado en la velocidad de la mezcla se encuentra en el rango de [2,32 – 2,69] luego el valor de C_o es 1,05. La velocidad media de traslación de la frente del pistón se compara en la Tabla 1 con la correlación de Bendiksen [12]. Analizando la Tabla 1 se observa que para los tres casos, el valor previsto numéricamente se encuentra próximo al valor definido por la correlación de Bendiksen, con un error máximo de 12,5%.

Tabla 1– Parámetro C_o del Pistón líquida

Casos	U_M (m/s)	C_o (Bendiksen 1984)	C_o (Numérico)	Erro (%)
1	1.083	1.05	0.987	6,0
2	1.181	1.05	0.919	12,5
3	1.304	1.05	0.964	8,2

La Tabla 2 presenta la comparación entre a velocidad de traslación del pistón líquida obtenido experimentalmente U_{TE} y el determinada numéricamente U_{TN} . Se puede notar que para esta variable se obtiene una excelente concordancia, con la diferencia máxima entre las dos estimativas de solamente 0,83%; y esta diferencia disminuye con el aumento de la velocidad de mezcla.

Tabla 2 – Velocidad media de los Pistones líquidos

Casos	U_M (m/s)	U_{TE} (m/s)	U_{TN} (m/s)	Erro (%)
1	1,083	1,32	1,331	0,83
2	1,181	1,35	1,347	0,22
3	1,304	1,52	1,518	0,13

Discusión

En las figuras 8 y 9 se presenta una comparación entre los valores numéricos y experimentales de las longitudes medias del pistón, para cada caso y en cada posición evaluada a lo largo de la tubería. Observase una excelente concordancia entre los valores obtenidos experimentalmente. Cabe observar que los valores medios correspondientes a los datos experimentales son aproximados, pues fueron obtenidos a partir de los histogramas disponibles en su trabajo. Como mencionado, observase el aumento de la longitud del pistón para las coordenadas más alejadas de la entrada

Además también presenta la longitud media a lo largo de la tubería, los cuales se encuentran en el rango de $14 - 20 L_s / D$, concordando con otros resultados registrados en la literatura (Dukler y Hubbard, 1975; Fabre y Liné, 1992). La diferencia entre los valores experimentales y numéricos para la longitud media del pistón en toda la tubería varía de 4,6% a 19,7%.

La evolución de la velocidad media frontal y posterior del pistón (a través del coeficiente C_0) a lo largo de la tubería. Se observa que en la entrada de la tubería la velocidad de la frente es mayor que la velocidad posterior del pistón, entonces el pistón comienza a crecer de longitud, con la frente desplazándose más rápido que la parte posterior. Se observa que las dos velocidades disminuyen hasta llegar a un valor aproximadamente constante (para $L/D \sim 20$), coincidiendo con el valor de la correlación de Bendiksen (1984). En general, para largos ductos, los pistones se desenvuelven tendiendo a una longitud aproximadamente constante. En los casos 1 y 3, la velocidad frontal difiere de la velocidad posterior, causando un aumento en la longitud del pistón, el cual es observado numéricamente y experimentalmente. En el caso 2, como las velocidades son prácticamente iguales la longitud del pistón se estabiliza.

Conclusiones

Se investigó numéricamente y experimentalmente el flujo agua/aire en el patrón de pistón en una tubería horizontal. Se implementó un programa en forma unidimensional utilizando el Modelo de Dos Fluidos.

Se obtuvieron numéricamente las variables estadísticas como la velocidad, frecuencia y longitud del pistón. Se obtuvo información experimental de las estadísticas de los pistones empleando una fotocélula, instalada en una sección de prueba construida con un tubo transparente con 400 diámetros de longitud.

Diferencias entre los valores medidos y determinados numéricamente varían entre 10 a 20% para la frecuencia y la longitud de los pistones, y para la velocidad de traslación del pistón la diferencia fue inferior a 1%.

Finalmente, se puede afirmar que se obtuvo una buena concordancia entre los valores medidos experimentalmente y obtenidos numéricamente con el Modelo de Dos Fluidos.

Referencias bibliográficas

- Andreussi, P., Bendiksen, K. (1989). *An investigation of void fraction in liquid slugs for horizontal and inclined gas-liquid pipe flow*, Int. J. Multiphase Flow, 15(6):937-46.
- Barnea, D., Taitel. (1993). *A model for slug length distribution in gas-liquid slug flow*, Int. J. Multiphase Flow, 19:829-838.
- Bendiksen, K.H. (1984). *An experimental investigation of the motion of long bubbles in inclined pipes*, Int. J. Multiphase Flow, 10(4):467-83.
- Carneiro, J.N.E., Ortega, A.J., Nieckele, A.O. (2005). *Influence of the interfacial pressure jump condition on the simulation of horizontal two-phase slug flows using the two-fluid model*, Multiphase Flow 2005 – 3rd International Conference on Computational Methods in Multiphase Flow, Portland, Maine, EUA, 1:123-134, 31 Outubro-2 Novembro 2005.

- Cook, M., Behnia, M. (2000). *Slug length prediction in near horizontal gas-liquid intermittent flow*, *Chemical Engineering Science*, 55:2009-2018.
- Fabre, J., Liné, A. (1992). *Modeling of two-phase slug flow*", *Annual Review of Fluid Mechanics*, 24:21-46.
- Fonseca R., Barras J.M., Azevedo, L.F.A. (2009). *Liquid velocity field and bubble shape measurements in two-phase, horizontal slug flow*, COBEM 2009, 20° Congresso Internacional de Engenharia Mecânica, Gramado, RS, Brasil, COB09-245, 15-20 Novembro 2009.
- Ishii, M., Hibiki, T. (2006). *Thermo-fluid Dynamics of Two-phase Flow*. Springer-Verlag.
- Issa, R.I., Kempf, M.H.W. (2003). *Simulation of slug flow in horizontal and nearly horizontal pipes with the two-fluid model*", *Int. J. of Multiphase Flow*, 29:69-95.
- Nicklin, D., Wilkes, J., Davidson, J. (1962). *Two-phase flow in vertical tubes*", *Trans. Inst. Chem. Engrs*, 40: 61-68.
- Taitel, Y., Dukler, A.E. (1976). *A model for predicting flow regime transitions in horizontal and near horizontal pipes*, *AIChE. Journal*, 22:47-55.
- Want, X., Guo, L., Zhang, X. (2007). *An experimental study of the statistical parameters of gas-liquid two-phase slug flow in horizontal pipeline*, *Int. J. of Heat and Mass Transfer*, 50:2439-2443.