

Caracterización hidrodinámica de una columna de burbujeo agua aire

M. Piedra-Díaz, N. García-Ramírez, L. Castro-González, L. González, A. Collazo-Quintana

Recibido el 10 de junio de 2008; aceptado el 22 de octubre de 2008

Resumen

Lograr determinar y evaluar los mecanismos que gobiernan los procesos de transporte entre las fases permite predecir el comportamiento de los sistemas multifásicos y establecer estrategias de diseño y de operación para obtener mayores rendimientos y mejoras tecnológicas en los equipos donde tienen lugar estos flujos. Para el estudio de los procesos de transporte es necesario lograr la combinación de metodologías de carácter teórico - experimental con la incorporación de las técnicas novedosas de análisis numérico. En este trabajo se plantea como objetivo desarrollar y construir una instalación experimental para el estudio de las características del flujo multifásico agua - aire. Se presentan resultados sobre la influencia de la fracción de gas y el Re en la forma de la columna bifásica.

Palabras claves: flujo Multifásico, hidrodinámica, mecánica de los fluidos.

Hydrodynamic characterization of a two phase water air column

Abstract

With the determination and evaluation of the governing mechanisms of transport processes between two phases, is possible to predict multiphase system behavior and to establish strategies to design and operate the equipment with the highest performance. To study transport processes is necessary to get the combination of theoretical and experimental methodologies with the necessary numerical analysis. The main objective of this study is to build an experimental installation in order to study the characteristics of water air multiphase flows. Results about the influence of gas fraction and Reynolds number in the shape of the biphasic column are presented.

Key words: two phase flow, multiphase flows, hydrodynamic, fluid mechanic

1. Introducción.

Si se lograran descifrar las incertidumbres de todo lo que no se puede observar, seguro que se analizaría con mayor calidad y eficacia el objeto de trabajo. A estos acontecimientos están muy vinculados los procesos que tienen lugar en cualquier sistema de la industria, y en el caso que ocupa al presente trabajo, a aquellos que tienen lugar en los sistemas de flujo. De ahí que en la actualidad, donde la competencia tecnológica se agudiza, se hace necesario de un desarrollo en el campo de la ingeniería basado en la excelencia del conocimiento científico.

En la industria es muy común trasegar flujos con presencia de aire producto de un mal sellaje de bombas, válvulas o cualquier elemento de unión. Esto sin embargo, no está registrado en las condiciones de operación de los diferentes sistemas de flujo, como por ejemplo, un equipo de intercambio de calor. En este sentido, se opera según diseño, y sin embargo el flujo real de líquido que se trasiega es menor al esperado. Además de esto, ocurre que en equipos de intercambio térmico el área de transferencia varía cuando ocurre la aparición de burbujas en el líquido refrigerante. Lo cierto es que la presencia del flujo multifásico desvía de lo esperado las condiciones de operación de cualquier sistema haciéndolo que opere en condiciones diferentes del diseño original, ver figura 2.

Para el desarrollo del presente trabajo se propone un modelo Eurliano, donde se considera que ambas fases son continuas, interpenetrables y que su intercambio es solo de momento. De esta forma, las ecuaciones que describen los cinco principios de la Mecánica de los Fluidos pueden resolverse para un espacio fijo, siendo esto aplicable a ambas fases. [1].

El flujo de trabajo será una mezcla de gas (aire) y agua y se considerara que ambas ocupan una parte específica del canal, sin ocupar una el lugar de la otra [2]. Así se aplican los conceptos de fracciones volumétricas y/o másicas en los volúmenes de control tomados como objeto de estudio. Para el modelo dado, las fracciones volumétricas y/o másicas se consideran funciones continuas en el tiempo y en el espacio, por lo

tanto, la suma de ellas en los volúmenes de control, será igual a la unidad.

Los estudios que se realizan van acompañados de la visualización del flujo para todas las condiciones hidrodinámicas que se plantean. Estos estudios de visualización son muy útiles para poder predecir el comportamiento de estos flujos en equipos de transferencia de calor y masa como: intercambiadores de calor, reactores nucleares, entre otras aplicaciones.

Aunque es muy común encontrar columnas de burbujeo a contracorriente, para este estudio se ha construido y equipado una columna de burbujeo vertical cuya operación es en concorrente, es decir la fase líquida es inyectada a la columna en el mismo sentido que la fase gaseosa [2].

Luego, en el presente trabajo se plantea determinar los siguientes parámetros de trabajo de La columna de burbujeo bifásica:

- La caída de presión.
- Las pérdidas hidráulicas.
- Los valores de las fracciones volumétricas de las fases.
- Visualización del comportamiento de las burbujas para determinar la velocidad alcanzada en el canal, distribución y tamaño de las mismas en un volumen de control determinado después de pasar la longitud de entrada L_e .

2. Desarrollo Experimental.

Para la realización de esta fase de la investigación se diseñó y construyó una instalación experimental, que facilitara el cumplimiento de los objetivos propuestos. En este sentido, se pueden determinar y calcular, a partir de los parámetros primarios, todo un grupo de parámetros característicos de los flujos y en especial del flujo multifásico objeto de estudio.

2.1 Descripción de la instalación.

La instalación experimental, figura 1, construida para el estudio del flujo Multifásico, está conformada por dos columnas de burbujeo; una vertical y otra horizontal, y las restantes tuberías de conexión.

Para el trabajo de la instalación se emplearon un grupo de equipos e instrumentos de medición, los que se describen a continuación:

1. Bomba motorizada,
2. Medidor de gasto por inducción magnética,
3. Compresor,
4. Rotámetro,
5. Cámara digital comercial de marca SONY,
6. Medidor de presión tipo Bourdon con escala de 0-4 kg/cm²,
7. Manómetro Tipo en U de mercurio.

8. Tanque colector y de alimentación.

La columna de burbujeo vertical, que es el objeto de estudio, es de cristal con un diámetro interior de 32 mm, una altura de 1550 mm y posee en ambos extremos tomas de presión para reportar los valores de caída de esta a través del sistema. Estos valores de presión son detectados por el manómetro del tipo Tubo en U

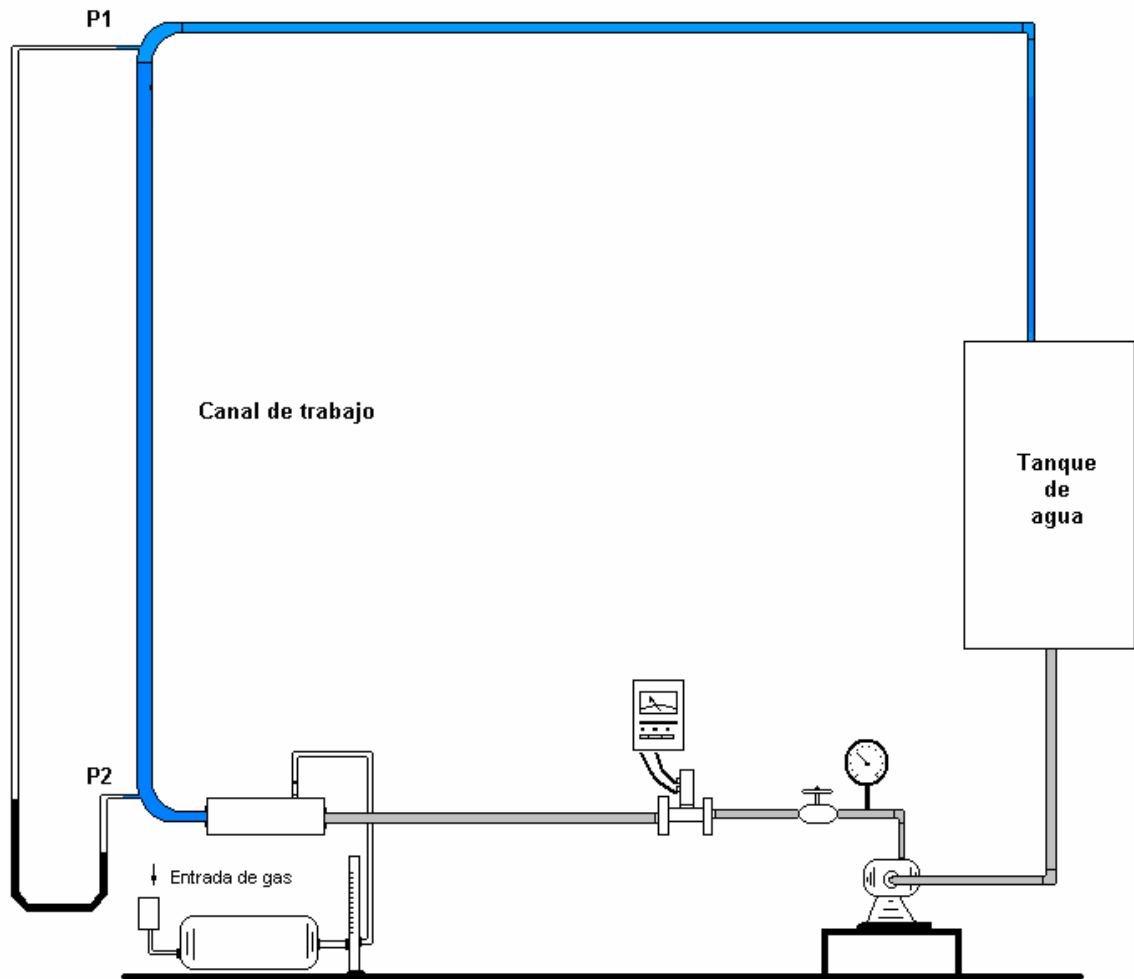


Figura 1. Esquema de la Instalación Experimental [3]

La bomba empleada para impulsar el flujo de agua es una bomba motorizada - centrífuga de una sola etapa, de la marca Shangai Micromotor, con los siguientes datos:

Motor monofásico de 3400 rpm, 110V, de 120 W y 2,9 A.

En operación, la bomba trabaja en un rango de presiones de 0.42 - 0.32 K_{gf}/cm², lo que se puede

visualizar a partir de la curva característica de la misma, ver figura 2.

La presión a la salida de la bomba es controlada con el manómetro del tipo Bourdon y la regulación del gasto de agua con una válvula situada después de la toma de presión.

En la figura 2 se han trazado dos curvas características. Esto se debe a que la bomba entrega un gasto menor al de diseño debido a la presencia del gas, el cual al llegar al sistema por infiltraciones y por el propio efecto del giro de la rueda de trabajo. En este caso la desviación del valor de diseño oscila entre un 3 – 7 %, que para instalaciones de alto riesgo pudiera ser intolerable. De ahí la importancia de medir el gasto de trabajo y no emplear la curva del fabricante.

El equipo utilizado para medir el gasto de agua es un Medidor de gasto por inducción Magnética, el cual presenta una exactitud de los valores registrados de acuerdo a los equipos de clase I.

El aire empleado como la segunda fase es suministrado al sistema mediante el compresor, el cual está apto para suministrar un gasto máximo al sistema de $1,69 \text{ m}^3/\text{h}$. A su vez, el gasto del mismo es controlado con el rotámetro, que esta

calibrado para trabajar a temperatura desde 15°C y presión ambiental.

Para un mezclado efectivo del agua y el aire, la instalación cuenta con un mezclador cilíndrico de 300 mm de largo por 60mm de diámetro, situado a la entrada del canal vertical.

Así mismo para garantizar el suministro de agua en circuito cerrado, se cuenta con un tanque que tiene la función de coleccionar y alimentar el agua al mismo. Este tiene una capacidad de 40 l y está ubicado a una altura de 300 mm sobre la línea principal de la bomba.

2.2 Puesta en marcha y operación.

Con la puesta en marcha fue posible el ajuste de los parámetros de trabajo de la instalación, lo que garantizó que los experimentos se realizaran, no solo satisfactoriamente, sino también de forma segura.

Algunos de los datos primarios obtenidos de las mediciones realizadas, son mostrados en la tabla 1, donde solo se presentan los valores de las presiones diferenciales entre los puntos 1 y 2, en mm de Hg, para las diferentes combinaciones del flujo de agua y aire.

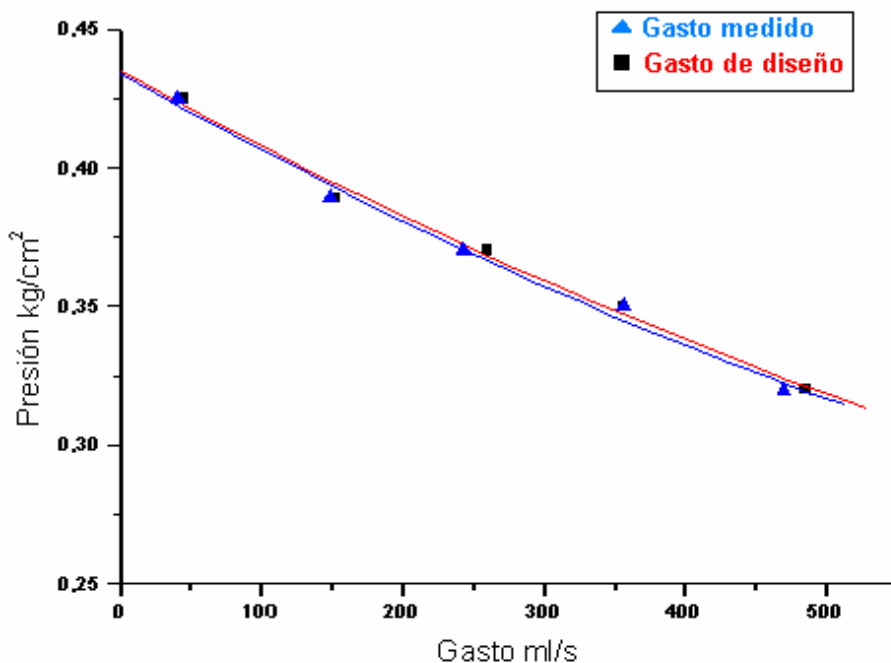


Figura 2. Curva característica de la bomba obtenida en el circuito de trabajo

Tabla No. 1. Valores de la columna manométrica (mm), para diferentes valores de los gastos de agua y aire

Agua/aire (ml/s)	470,59	440	400	357,14	295,87
0.0	9	8,7	8,3	7	6,43
11.389	1	1,3	1,7	2,5	3
61.11	2,41	2,6	3	3,67	5,2
130.556	6	6,25	6,7	7	10,67

Agua/aire (ml/s)	243,9	192,41	149,25	89	41,24
0.0	3,5	2,2	1,79	1,34	1
11.389	3,43	5	6,5	8,77	10
61.11	6	8,93	10,5	11,78	13,18
130.556	12	12,43	13	15	21

Al observar los valores de la columna manométrica puede apreciarse que estos disminuyen al disminuir el gasto de agua, cuando no hay presencia de aire, como es de esperar. Pero en el caso del flujo bifásico ocurre lo contrario. Como el fluido de trabajo es una combinación de agua y gas, en la medida que la fracción de gas aumenta, la densidad resultante disminuirá respecto al valor del agua, incrementándose el efecto convectivo del flujo de trabajo, y este comportamiento se refleja en la columna de mercurio. Este efecto puede evaluarse por la ecuación de carga hidrostática de la columna de burbujeo.

$$P_{motriz} = h_{mezcla} g (\rho_{agua} - \rho_{mezclas})$$

$$P_{motriz} = h_{mezcla} g \psi_{gas} (\rho_{agua} - \rho_{gas})$$

Una vez concluidas las mediciones para las diferentes mezclas de aire y agua, el siguiente paso consiste en evaluar el conjunto de ecuaciones de la hidrodinámica aplicadas a este modelo. O sea, es necesario relacionar el modelo teórico asumido, con las condiciones hidrodinámicas de la columna de burbujeo.

Estas ecuaciones son:

Ecuación de balance estático en la columna de mercurio.

$$P_2 - P_1 = h_{Hg} g (\rho_{Hg} - \rho) + (z_1 - z_2) \rho g \quad (1)$$

Ecuación de balance dinámico en el canal de trabajo:

$$P_2 - P_1 = \sum \Delta P_f + (z_1 - z_2) \rho_m g \quad (2)$$

Al comparar ambas ecuaciones se puede apreciar que si la columna de trabajo tuviese fluido monofásico, entonces la columna de mercurio registraría solo las pérdidas que tienen lugar en dicho canal.

$$h_{Hg} g (\rho_{Hg} - \rho) + (z_1 - z_2) \rho g = \sum \Delta P_f + (z_1 - z_2) \rho_m g$$

$$h_{Hg} g (\rho_{Hg} - \rho) = \sum \Delta P_f - (z_1 - z_2) (\rho - \rho_m) g \quad (3)$$

$$\sum \Delta P_f = h_{Hg} g (\rho_{Hg} - \rho) + (z_1 - z_2) (\rho - \rho_m) g$$

En el caso contrario, además de las pérdidas está presente el efecto convectivo del gas. Las propiedades de la mezcla resultante se pueden determinar conociendo las fracciones que intervienen en el flujo de trabajo, donde θ representa a cualquiera de los parámetro termofísico de interés y ψ la fracción de las fases [4, 5].

$$\theta_m = (\theta \psi)_{liq} + (\theta \psi)_{gas} \quad (4)$$

Las pérdidas que tienen lugar en el canal de trabajo en presencia del flujo bifásico, deben ser analizadas en función de la fracción de gas. Esto se debe a que prevalece el efecto del aumento del volumen específico de la mezcla, y por lo tanto, la velocidad de la mezcla aumenta.

O sea, aunque la densidad disminuye, la velocidad de la mezcla, que toma valores cuadráticos, aumenta más respecto a los valores del flujo monofásico, como se muestran en los gráficos de la figura 3.

En este caso, la tendencia de la curva de pérdida mantiene su característica cuadrática creciente $\sum \Delta P_f = f(Q^2)$, lo que indica la estabilidad del flujo bifásico, [6, 7].

Los gráficos de la figura 4 muestran lo planteado anteriormente. O sea, se muestra el aumento de las pérdidas hidráulicas en la columna de trabajo cuando aumenta la fracción de gas en la mezcla bifásica, que en este caso ha sido evaluada a partir

del aumento del gasto de gas, para valores del gasto de agua constantes.

Por las características que presenta el comportamiento de la columna manométrica cuando hay presencia de gas en el flujo, esta pudiera resultar un indicador muy confiable para poder inferir la presencia de este en un circuito donde se trasiega líquido sin la necesidad de visualizar el flujo.

En cuanto a la diferencia de presiones entre los puntos 1 y 2, esta depende de la presión que suministra la bomba y la posterior caída de presión que tiene lugar en el canal debido a las pérdidas hidráulicas, las que dependerán de las propiedades termofísicas del fluido multifásico que se estudia, como se muestra en la figura 5

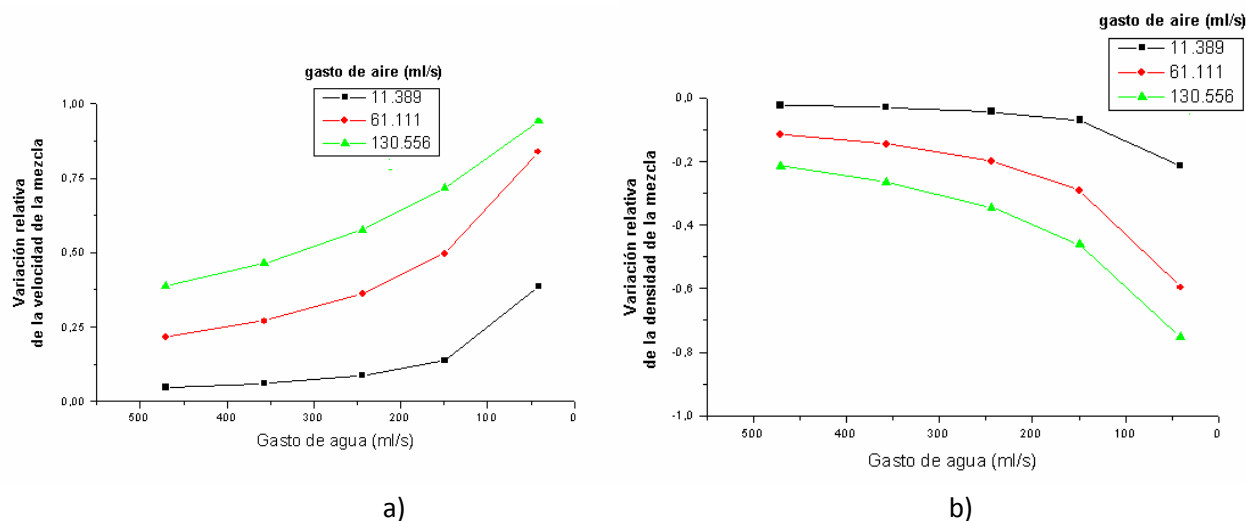


Figura 3. Influencia de la fracción de gas en la variación relativa de a) la densidad de la mezcla b) la velocidad de la mezcla.

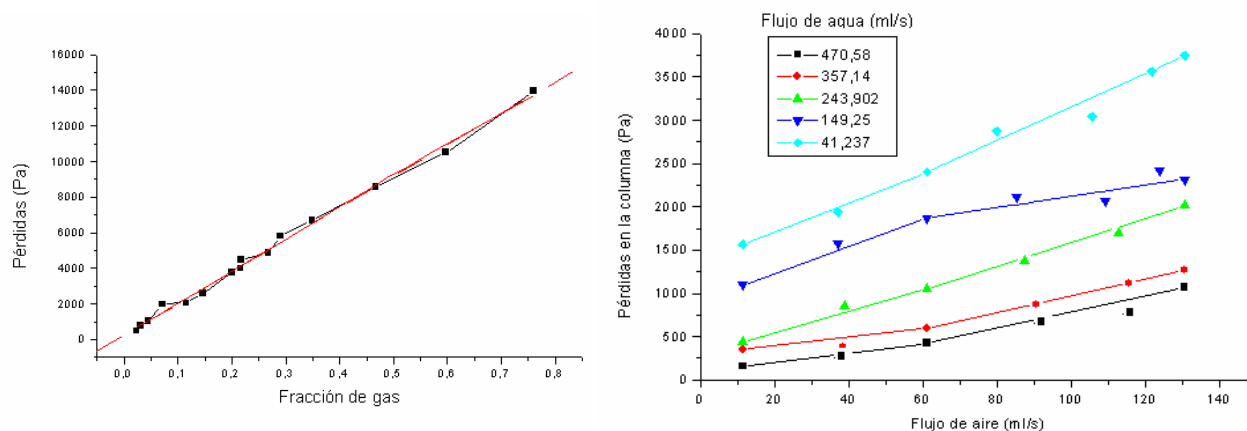


Figura 4. Influencia de la fracción de gas en las pérdidas hidráulicas del flujo multifásico

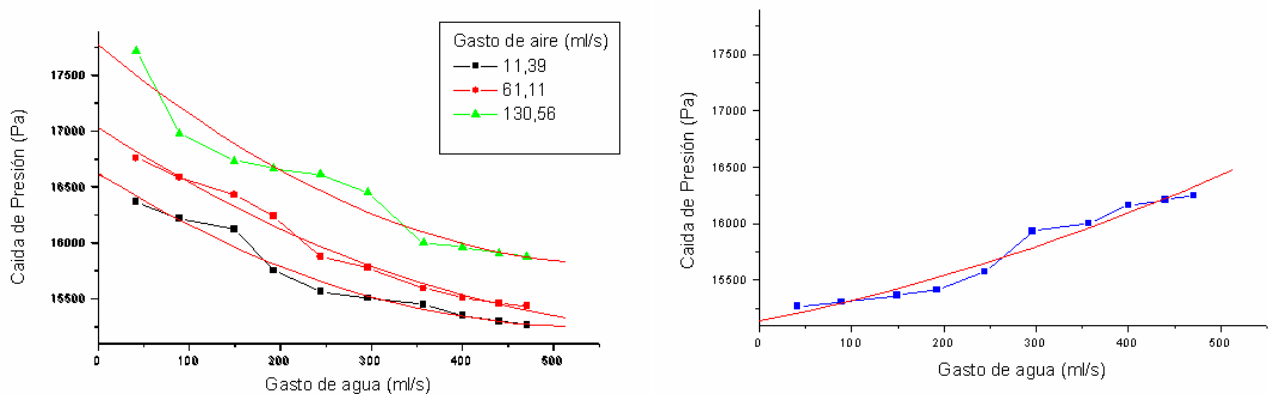


Figura 5. Caídas de presión en la columna de burbujeo

Esta gráfica muestra, comparativamente, el efecto de las propiedades del fluido en su comportamiento hidrodinámico. Como se observa, este comportamiento es cualitativamente similar al comportamiento de las pérdidas hidráulicas, figura 4, lo que pone de manifiesto, una vez más, la estabilidad hidrodinámica del sistema que se estudia.

Aquí se vuelve a manifestar el efecto del gas en la hidrodinámica del flujo bifásico.

Este efecto también puede ser utilizado para inferir la presencia de gas en los circuitos cerrados de flujo monofásico o de flujo bifásico cuando la fracción del gas varía [8].

De todo lo planteado anteriormente se desprende que las fracciones de las fases en la mezcla bifásica son los parámetros directores de cualquier instalación con flujo bifásico. Como se ha podido constatar, de ellas dependen todos los parámetros termofísicos del fluido y los descriptores hidrodinámicos de la instalación.

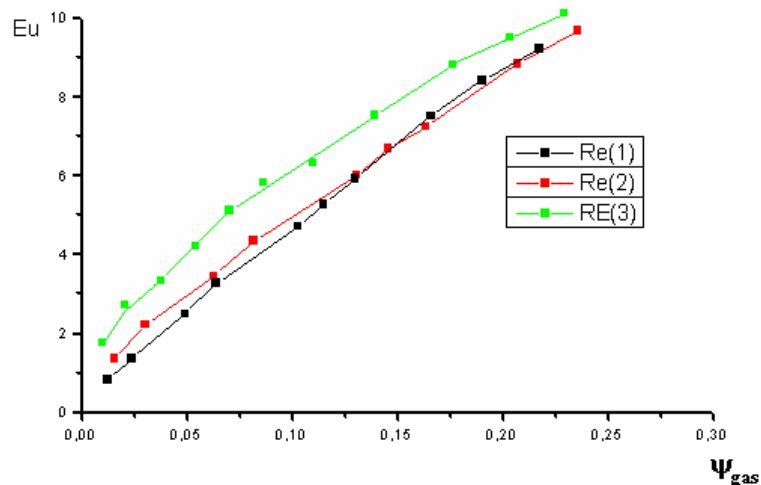


Figura 6. Dependencia de las pérdidas hidráulicas de la fracción de gas para $Re_1 = 20,736 \cdot 10^3$, $Re_2 = 15,340 \cdot 10^3$, $Re_3 = 6,574 \cdot 10^3$

Esta dependencia infiere que las relaciones entre los parámetros termofísicos del fluido multifásico y las características hidrodinámicas del sistema guardan una relación que puede ser representada analíticamente. Precisamente, a partir del conocimiento de todas las variables que intervienen en el proceso, se ha podido arribar a una dependencia, que ha sido obtenida con la aplicación del análisis dimensional, [9, 10]. Esta presenta la siguiente forma:

$$E_u = C_{ex} \left[(\psi_{gas})^q, (R_{ed})^p, \left(\frac{e}{d} \right)^r \right] \quad (5)$$

$$E_u = 4,21 (C (\psi_{gas})^{1,82} (R_e)^{0,28})$$

Esta expresión ha sido obtenida para las siguientes condiciones:

$$R_e = \frac{V_{líquido} d \rho_{líquido}}{\mu_{líquido}}$$

Para la fracción de gas en la mezcla se trabajó en el rango, $0,012 < \psi < 0,4$. En este caso no se evalúa la rugosidad relativa pues esta investigación formará parte de trabajos futuros.

La figura 7, presenta como se incrementa el coeficiente de pérdidas totales en la medida en que aumenta la cantidad de gas en el flujo, [11, 12].

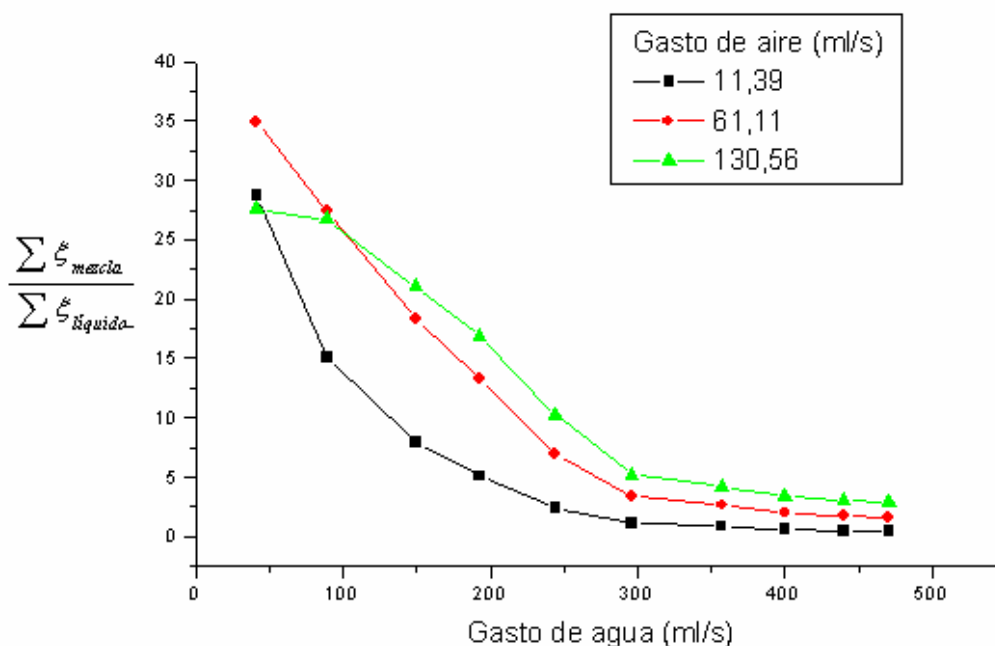


Figura 7. Aumento relativo del coeficiente total de pérdidas respecto a la fracción de gas en la mezcla

Esto demuestra la disipación energética que tiene lugar en el canal por el efecto del aumento de la turbulencia en el flujo, por las burbujas. Como se puede apreciar también, se ha obtenido una familia de curvas que mantienen un comportamiento cualitativo similar, con excepción de la curva superior, donde el comportamiento es diferente dado el valor tan elevado de la fracción de gas, lo que afirma la veracidad de la dependencia obtenida, dada por la ecuación 5.

La calidad de la mezcla bifásica pudo ser calificada por la observación directa de estos flujos. Para cada fracción de gas se pudo observar la estructura presentada por la mezcla. En total fueron estudiadas 30 combinaciones de agua aire. Las figuras que se muestran a continuación, presentan algunas de las estructuras observadas.

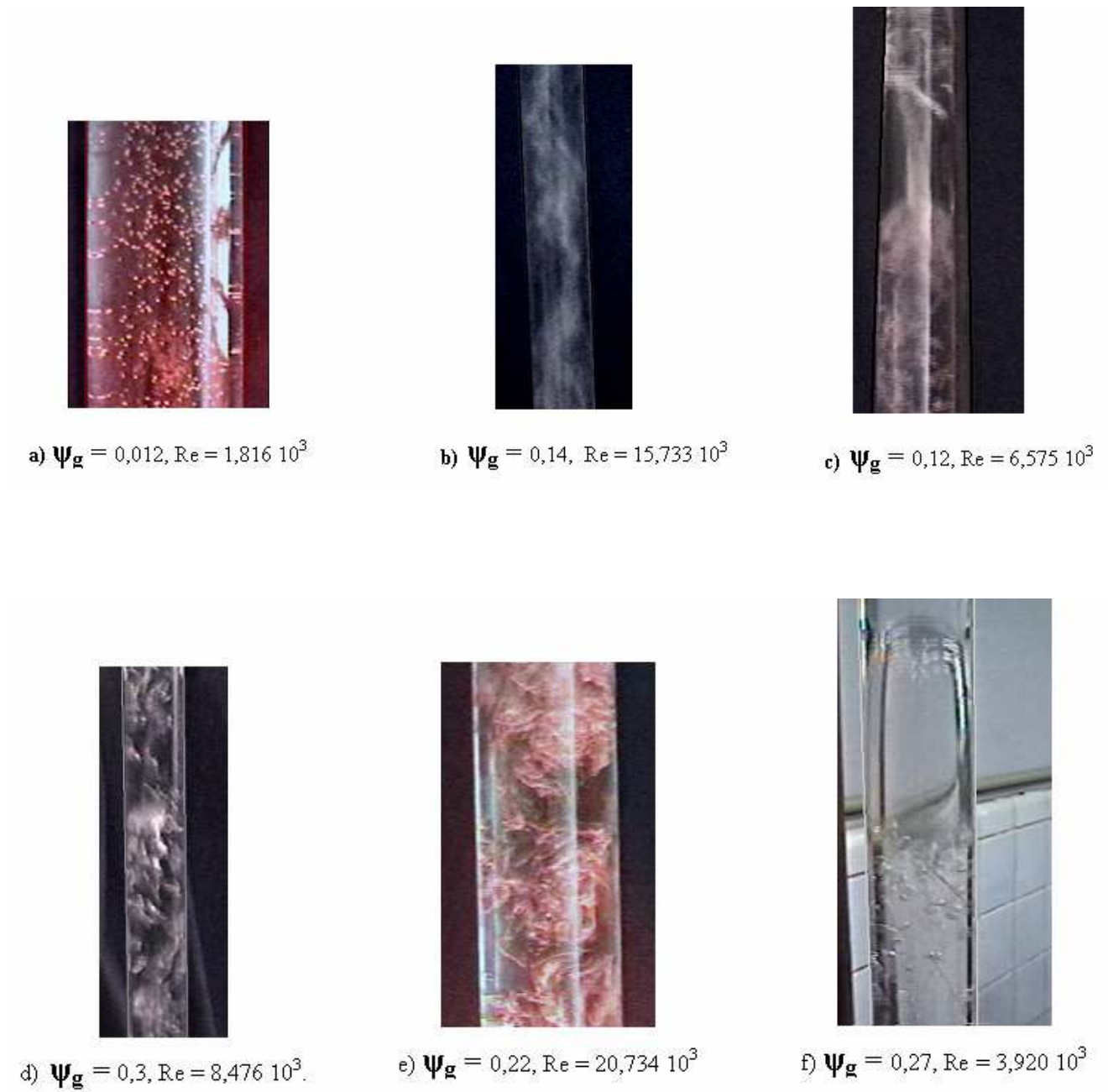


Figura 8. Estructuras del flujo bifásico para diferentes relaciones aire-agua.

3. Conclusiones.

1. Por los resultados de la investigación realizada, queda demostrado que en un flujo bifásico gas-agua, la fracción de gas en la mezcla es un parámetro de vital importancia. Sin embargo, este parámetro no puede ser visto aisladamente en el contexto del estudio hidrodinámico.
2. Las estructuras de los flujos estudiados han permitido conocer la afectación que produce la presencia de un gas en el seno de un fluido, aunque esta magnitud tenga valores insignificantes.
3. El estudio de las estructuras complejas que ha presentado el flujo bifásico facilitará la construcción de modelos teóricos más exactos al conocerse las interacciones entre los parámetros fundamentales que lo caracterizan.

4. Referencias.

1. *Instalaciones de Laboratorio de Mecánica de los Fluidos*. Instec, 2006.
2. **VIVEK, E. R.** Computacional Flow Modeling for Chemical Reactor Engineering. *Academic Press*, 2002, vol. 5, nº
3. *Instalaciones de laboratorio de Mecánica de los Fluidos*. Dpto. Ingeniería, InSTEC, 2005.
4. **PIJUS, K. K.** *Fluid Mechanic*. Second Edition ed. Academic Press, 2002.
5. **WHITE, F. M.** *Mecánica de los Fluidos*. McGRAW – HILL, 1988.
6. **TOSUM.** *Modelling in Transport Phenomena*. Elsevier Science, 2002.
7. **PAPANASTASIOU, T. C.** *Viscous Fluid Flow*. CRC Press LLC, 200.
8. **BRENNEN, C.** *Fundamentals of Multiphase Flows*. California, USA: California Institute of Technology, Cambridge University, 2005.
9. **ISACHENKO, V.** *Transmisión de Calor*. La Habana, Cuba: Editorial Pueblo y Educación, 1984. vol. 1,
10. **PORTUONDO DUANY, R.** *Procesamiento de datos experimentales*. La Habana, Cuba: Universidad de La Habana, 1988.
11. **TAKAMASA, T.; GOTO, T., et al.** *Experimental study of interfacial area transport of bubbly flow in small-diameter tube*. 2002.
12. **HIBIKI, T. y MISHIMA, K.** *Some characteristics of air-water two-phase flow in small diameter vertical tubes*. Osaka, Japan: Research Reactor Institute, Kyoto University, 1996.
13. **WU, Q.; KIM, S., et al.** *One group interfacial area transport in vertical bubbly flow*. 1997.

M. Piedra Díaz, N. García Ramírez, L. Castro González, L. González G., A. Collazo Quintana

Instituto Superior de Tecnologías y Ciencias Aplicadas, InSTEC. Cuba

E-mail: mpiedra@instec.cu, acollado@aen.energia.inf.cu, leonel@orasen.co.cu