

Determinación de la agitación de una suspensión de burbujas usando tratamiento de imágenes

*Rodolfo Agustín Alcalá Bucio¹, Alicia Aguilar Corona¹,
Bernardo Figueroa Espinoza² y Jesús A. Vargas Correa¹*

¹Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo; ²Laboratorio de Ingeniería
y Procesos Costeros, Sisal, Yucatán.

Resumen

Este artículo presenta los resultados experimentales relativos al estudio de una suspensión de burbujas confinadas en un canal Hele-Shaw para diferentes fracciones de volumen de gas. El montaje experimental consiste en una celda Hele-Shaw, rellena de agua, teniendo en la parte inferior un banco de capilares para obtener una suspensión de burbujas casi monodispersa con respecto al diámetro. Una técnica de trayectografía utilizando una cámara de alta velocidad y un sistema de retroiluminación led fue utilizado para obtener las trayectorias y velocidades de las burbujas por medio de un tratamiento de imágenes.

Abstract

This paper presents experimental results concerning the study of a suspension of bubbles confined in a Hele-Shaw cell type channel for different volume fractions of gas. The experimental set-up consisted in a vertically oriented Hele-Shaw cell thin

channel, modified with a bubble production device located at the bottom. A high speed camera, a diffused backlight system, and a rotameter were used in order to obtain a nearly monodispersed bubbly suspension. A trajectography technique was used to obtain the bubbles trajectories and velocities.

Keywords: Trajectography technique, bubbly suspension, image processing.

I. Introducción

Es importante comenzar definiendo el concepto de flujos burbujeantes como sistemas bifásicos constituidos de una fase continua líquida y una fase gaseosa dispersa bajo la forma de burbujas. Debido a la diferencia de densidad entre el gas y el líquido, las burbujas en su trayectoria de ascenso originan movimientos de conjunto lo que produce la agitación en el líquido y la difusión de las burbujas en el medio. Si bien la ascensión de una sola burbuja a lo largo de un canal, ya es un problema interesante, el estudio de una serie de burbujas se vuelve aún más desafiante, ya que en éste se debe considerar la interacción hidrodinámica entre ellas. Las estelas producidas por cada burbuja van a modificar la estructura de las fluctuaciones del movimiento del fluido. El movimiento de ascenso de las burbujas se ha reportado en tres formas principales: rectilínea, oscilante y en zigzag [De Vries 2001, Ellingsen & Risso 2001, Riboux 2007, Adoua 2007]. La forma de este movimiento depende en gran medida del número de Weber. De tal manera que, a pequeños números de Weber las burbujas tienden a adoptar formas esféricas y a tener trayectorias rectilíneas, a medida que el valor de este número adimensional aumenta la forma de las burbujas tiende a ser oblicua y a tener trayectorias oscilatorias. Entre la variedad inmensa de problemas relacionados con flujos burbujeantes [Cliff et al., 1978], muchas aplicaciones involucran suspensiones burbujeantes a altos números de Reynolds. A pesar de que el movimiento de una sola burbuja [Moore 1965], e incluso la interacción entre pares de burbujas han sido explicadas por medio de contribuciones teóricas [Kok 1993], experimentales [Duineveld, 1995] y numéricas [Legendre & Magnaudet, 2003], es de gran complejidad matemática el estudio analítico de suspensiones burbujeantes [Koch 1993, Van Wijngaarden 1997]. Debido a lo anterior la problemática más importante que se presenta en este campo es la falta de un banco de datos experimentales que valide a los modelos matemáticos [Figueroa et al., 2005, Riboux, 2007, Zenit et al. 2000, Zenit et al. 2001].

En el presente trabajo se presenta un método de trayectografía en 2D a partir de la adquisición de imágenes utilizando una cámara de alta velocidad y un software especializado de tratamiento de imágenes. El resultado de este proceso permite determinar la posición, trayectoria velocidad de burbujas individuales en la celda, con el fin de obtener la agitación (fluctuaciones de velocidad) en una suspensión de burbujas a altos números de Reynolds con un método similar al llevado a cabo por Figueroa en 2005. La importancia del estudio de flujos burbujeantes en el ámbito industrial tienen su principal aplicación en el área de la agitación debido a su capacidad de mejorar el transporte de masa y calor en los procesos industriales y ambientales. Por ejemplo en la remoción de partículas para la limpieza de combustibles como el lavado de biodiesel, recuperación de minerales, hidroponía y agitación en procesos siderúrgicos.

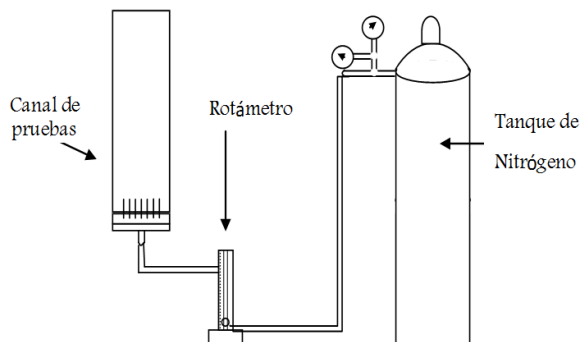


Figura 1. Configuración del dispositivo experimental.

II. Dispositivo experimental

En la Figura 1 se ilustra la configuración del sistema utilizado para la experimentación, el cual consta de un canal delgado de pruebas tipo Hele-Shaw, en el cual se forma la suspensión de burbujas. El fin de que el canal sea delgado es para efectuar el estudio de manera bidimensional.

Las dimensiones del canal son de 20 cm de ancho y 120 cm de altura, con un espesor entre placas de 5mm (ver Figura 2)

En la parte inferior de este canal se encuentra el banco de capilares, que consiste en un arreglo lineal de 7 capilares con diámetro interno de 0.39 mm. El tamaño del capilar es básicamente el que nos define el tamaño de la burbuja y tiene relación con la fracción gaseosa.

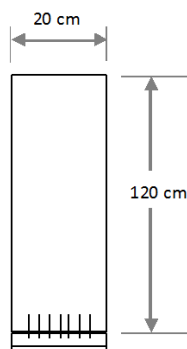


Figura 2. Canal de pruebas.

El gas es suministrado desde un tanque con nitrógeno con una pureza de 99.995% que se conecta por la parte inferior del canal directamente a una cama de gas que está colocado debajo del banco de capilares. La función de esta cama es distribuir el gas por cada uno de los capilares, así como ayudar a soportar la presión hidrostática ejercida por el agua (ver Figura 3). El flujo de gas nitrógeno que es inyectado a la celda es controlado por un rotámetro.

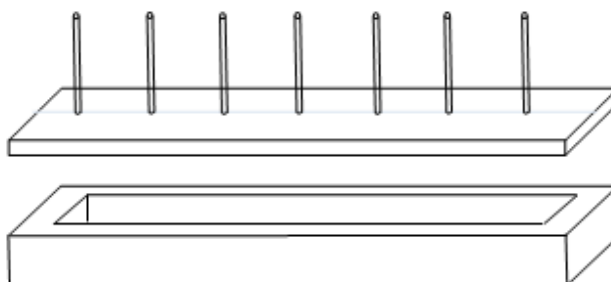


Figura 3. Cama de gas bajo el banco de capilares.

III. Técnica de medición

La disposición del experimento se ilustra en la Figura 4. El cual consiste de cuatro elementos: canal de pruebas, cámara de alta velocidad, sistema de iluminación y un sistema de adquisición de datos.

El panel de led se coloca en la parte posterior del canal de pruebas para iluminar la zona que interesa grabar, en el interior del canal de pruebas las burbujas están ascendiendo mientras son grabadas por una cámara de alta velocidad. Una PC está

sincronizada con la cámara de alta velocidad, con el objetivo de observar el experimento en tiempo real y finalmente las imágenes son guardadas para su posterior tratamiento.

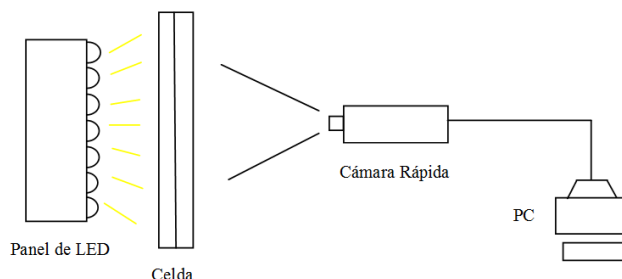


Figura 4. Cama de gas bajo el banco de capilares.

Una vez que se ha obtenido la posición temporal y espacial de cada una de las burbujas, las trayectorias son determinadas y con ello el cálculo de las velocidades transversales y axiales. Para esto se realiza un tratamiento que consta de cinco etapas:

Etapas 1. Lectura de la imagen. La imagen es convertida en una matriz cuyo número de filas y columnas corresponde a la resolución de la imagen. El valor de cada una de las celdas de la matriz corresponde al nivel de gris, para este caso la imagen posee 256 tonos de grises. De forma tal que el valor de 0 corresponde al color negro y el de 255 al color blanco (Figura 5a).

Etapas 2. Sustracción: consiste en eliminar el fondo a cada una de las imágenes, con el fin de visualizar sólo las burbujas (Figura 5b).

Etapas 3. Binarización de la imagen: Consiste en convertir la imagen en una imagen binaria, es decir, en blanco y negro. (Figura 5c)

Etapas 4. Identificación de las burbujas. Una vez terminadas las dos etapas anteriores, se puede observar con claridad que las burbujas son círculos con un vacío en el centro. En esta etapa se rellenan estos vacíos. Esto con la finalidad de identificar las burbujas como los pixeles blancos en la imagen y de esta forma medir su área (Figura 5d). Este dato permite calcular la fracción gaseosa de la zona de visualización ya que está dada por la cantidad de pixeles blancos en relación con la cantidad de pixeles totales en la imagen.

Etapas 5. Calcular el centroide de cada burbuja. A partir de la imagen binaria se cuenta el número de burbujas, la conectividad de 8 es utilizada para diferenciar una

burbuja de la otra. Una vez diferenciadas se procede a calcular el centroide de cada burbuja guardando esta información para poder seguir el movimiento de cada burbuja durante el tiempo de grabado (Figura 5e) y de esta forma reconstruir la trayectoria.

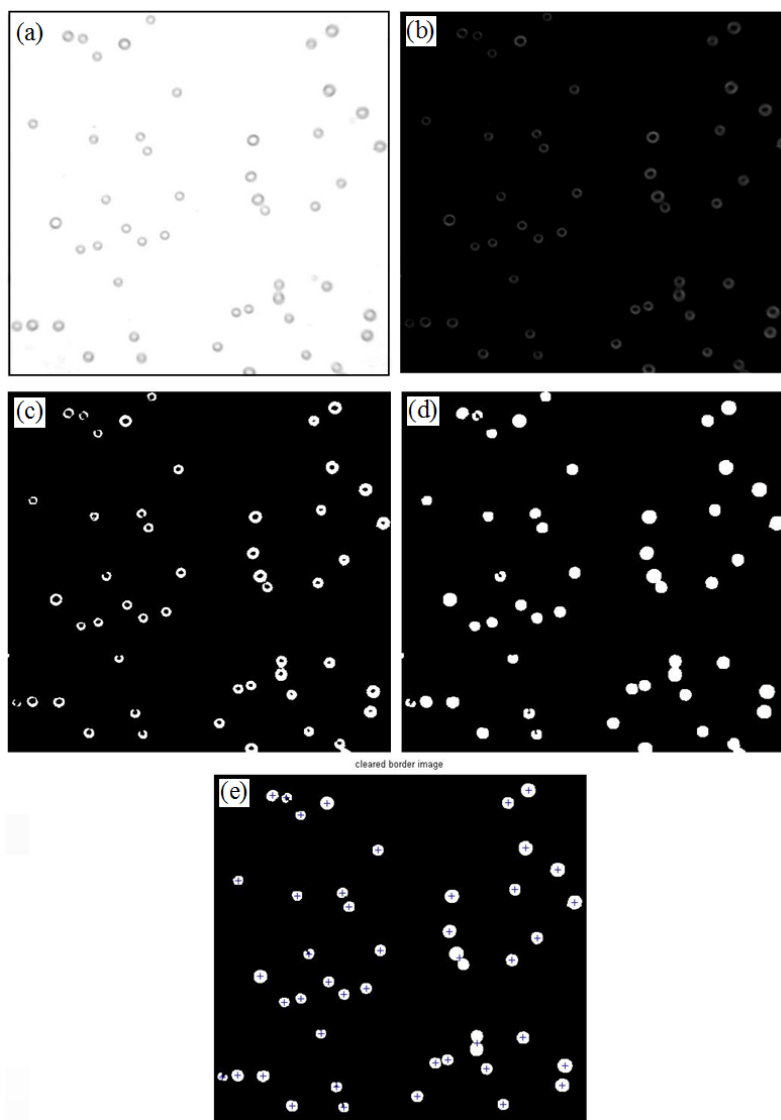


Figura 5. Etapas del tratamiento de imágenes (a) Lectura de imagen, (b) Sustracción, (c) Binarización, (d) Identificación y (e) Identificación del centroide.

IV. Resultados

El objetivo de este trabajo es calcular la agitación producida en el sistema, únicamente variando la fracción de gas que entra en éste y el número de Reynolds. Para este trabajo se estudiaron cuatro fracciones gaseosas identificadas como α : 4, 7.5, 8 y 9%. La Figura 6 muestra una imagen representativa para cada una de las concentraciones.

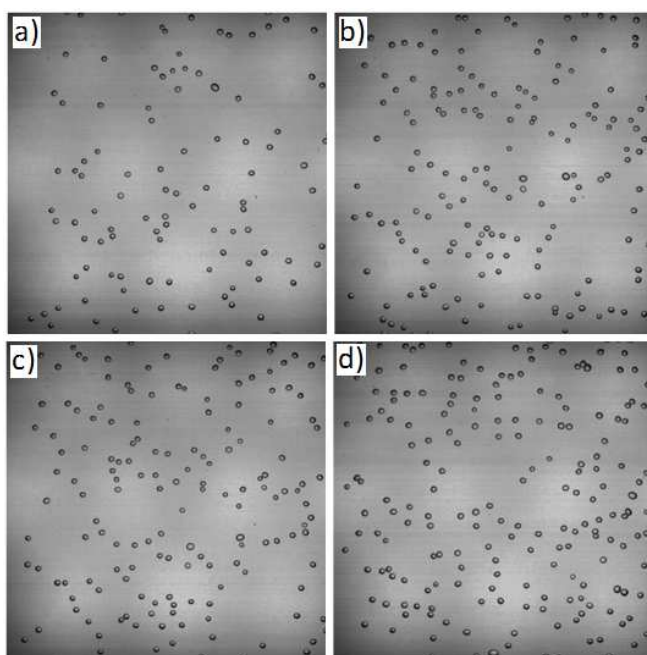


Figura 6. Imágenes representativas: a) 4%, b) 7.5%, c) 8% y d) 9%.

Se toman concentraciones menores de 10%, debido a que por encima de esta concentración se vuelve complicado seguir la trayectoria individual de la burbuja y empieza la formación de aglomerados. La coalescencia es un efecto indeseable y está presente aún a concentraciones bajas, por lo que para disminuir este efecto, se agregan 0.05 moles (~10 g) de sulfato de magnesio por litro de agua [Zenit, 2001].

La determinación de las trayectorias es importante porque muestra la posición de la burbuja a diferentes tiempos a lo largo de su recorrido de ascenso. En este caso se obtuvieron trayectorias de zigzag, como las mostradas en la Figura 7.

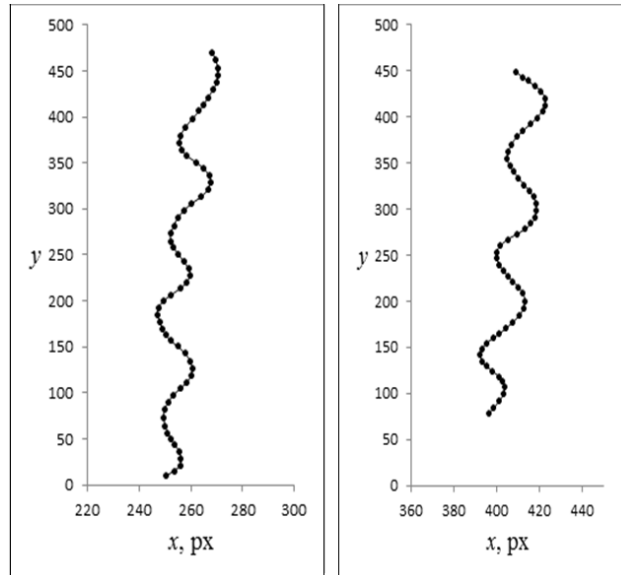


Figura 7. Trayectorias típicas.

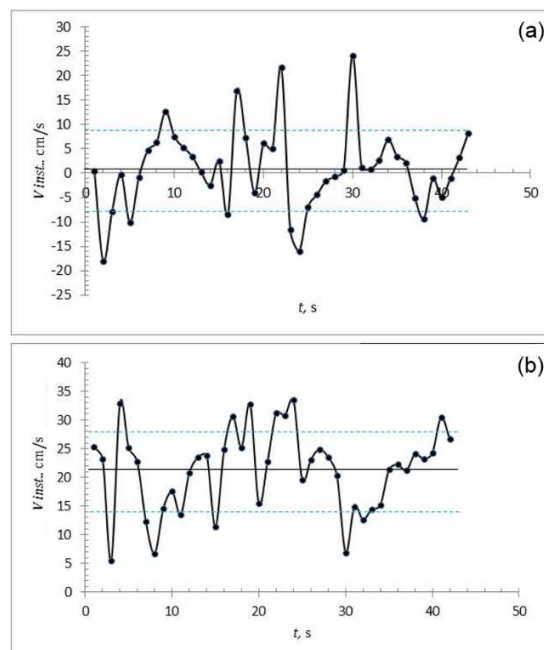


Figura 8. Velocidades instantáneas para una concentración de 4%: (a) transversales, (b) axiales.

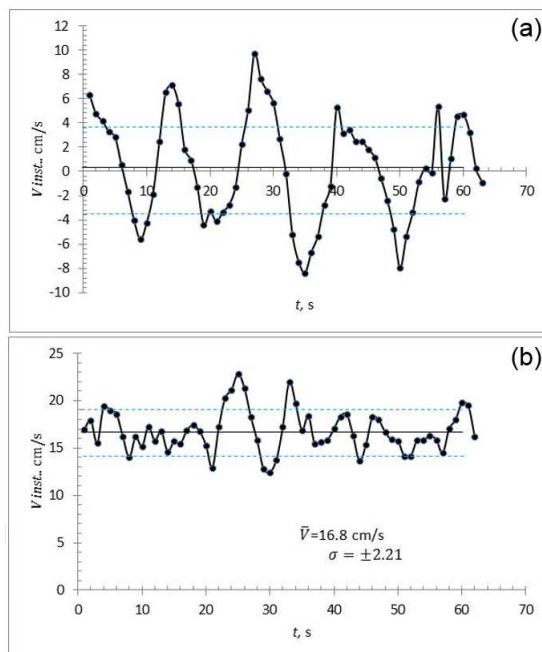


Figura 9. Velocidades instantáneas para una concentración de 8%: (a) transversales, (b) axiales.

V. Determinación de las velocidades de ascenso de las burbujas

Una de las partes importantes en el procesamiento de imágenes es calcular las velocidades instantáneas y medias durante el recorrido de la burbuja y de esta forma obtener la velocidad fluctuante.

En las Figuras 8 y 9 se muestran gráficas de velocidades instantáneas transversales y axiales contra el tiempo para dos concentraciones estudiadas. Las velocidades instantáneas son calculadas a partir de la diferencia en las posiciones (x,y) que tiene la burbuja y el tiempo transcurrido entre dos imágenes. En el caso de la Figura 8a y Figura 9a que corresponden a las velocidades transversales se monitorean velocidades negativas debido a que las burbujas, en este sistema, presentan un movimiento oscilatorio (ver Figura 7) en el eje x. Se observa que la amplitud para las velocidades transversales es menor que velocidades axiales, lo que demuestra anisotropía en el sistema y confirma un movimiento preferencial de las burbujas en el eje axial.

Graficando la velocidad media global de ascenso de las burbujas contra la fracción de gas (ver Figura 10), podemos apreciar un comportamiento decreciente de esta velocidad.

Comparando los resultados obtenidos de este trabajo con el modelo propuesto por Spelt y Sangani (1998), el cual predice el comportamiento de la velocidad de la burbuja en una suspensión homogénea de burbujas esféricas subiendo en un fluido, encontramos la misma tendencia descrita por los resultados obtenidos en este trabajo.

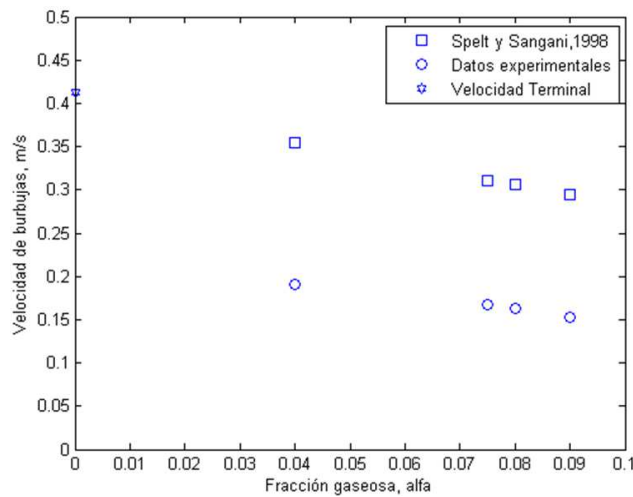


Figura 10. Comportamiento de la velocidad media.

VI. Determinación de la agitación

El cálculo de la agitación está basado en la velocidad fluctuante de las burbujas para cada instante de tiempo en el eje axial, $Var(V_f) = (V_{inst} - \bar{V})^2$. Debido a que en este tipo de sistema el líquido se encuentra en reposo, la agitación se produce únicamente por el movimiento de las burbujas. La varianza promedio de cada una de las trayectorias está definida como $\overline{Var(V_f)} = \frac{\sum_{i=1}^N Var(V_f)_i}{N}$, donde N representa el número total de datos de la i -ésima medición. Para cada concentración el valor representado de agitación es T_b que es el promedio global de un total de 500 trayectorias estudiadas para cada concentración. Para adimensionalizar el valor de agitación, se utiliza la velocidad media global de todas las trayectorias elevada al cuadrado $\varphi_{ad} = \frac{T_b}{\bar{V}^2}$.

Los valores de agitación para la dirección axial son mostrados en la gráfica de la Figura 11. Esta adimensionalización de la varianza con el cuadrado de la velocidad media total para cada una de las concentraciones resulta tener una tendencia decreciente con respecto a la fracción gaseosa. Comparando con Zenit *et al* (2001), resulta una tendencia contraria de agitación con el aumento del flujo de gas, lo cual podemos atribuir a un efecto de pared debido al confinamiento ya que el estudio se hizo en 2D, mientras que el de Zenit fue en las tres dimensiones.

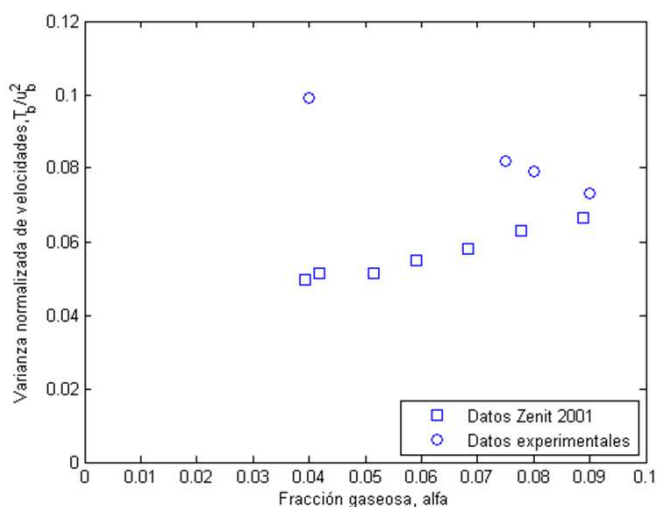


Figura 11. Comparación de la agitación contra fracción gaseosa.

VI. Conclusiones

En este trabajo se determinaron las velocidades de burbujas en una suspensión de burbujas confinadas en una celda tipo Hele-Shaw, utilizando un tratamiento de imágenes. El comportamiento de las burbujas resultó ser en forma de zig-zag, con movimiento preferencial en el eje axial. La agitación axial producida por el movimiento de las burbujas fue determinada para las diferentes fracciones gaseosas (0.04, 0.075, 0.08 y 0.09) teniendo un comportamiento decreciente con respecto al aumento de fracción gaseosa. Esto atribuido a que al momento de aumentar el número de burbujas en el canal el desplazamiento del conjunto se ve afectando con la disminución de la velocidad.

Los resultados de este trabajo contribuyen a la validación de modelos numéricos bifásicos ya que se proveen datos estadísticos de trayectorias de burbujas utilizando

una técnica no invasiva, como es la trayectografía con cámara de alta velocidad lo que le da confiabilidad a los resultados, a diferencia del uso de técnicas invasivas.

Agradecimientos. Se agradece a la Coordinación de la Investigación Científica y al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología por el apoyo financiero y la beca otorgada al alumno en la realización de este trabajo de investigación.

Referencias

- Adoua S. 2007. Hydrodynamique d'une bulle déformée dans un écoulement cisailé. Tesis del Institut National Polytechnique de Toulouse. Francia.
- Clift R., Grace R. J. y Weber M. E. 1978. Bubbles, drops and particles. Academic. 380 pp.
- Duineveld P. C. 1995. The rise velocity and shape of bubbles in pure water at high Reynolds number. J. Fluid Mech. 292: 325-332.
- Ellingsen K. Risso F. 2001. On the rise of an ellipsoidal bubble in water: oscillatory paths and liquid-induced velocity. J. Fluid Mech. 440: 235-268.
- Figuera B. y Zenit R. 2005. Clustering in high Re monodispersed bubbly flows. Phys. Fluids. 17: doi: 10.1063/1.2055487.
- Koch D. L. 1993. Hydrodynamic diffusion in dilute sedimenting suspensions at moderate Reynolds numbers. Phys. Fluids, A(5): 1141-1155.
- Kok J. B. W. 1993. Dynamics of a pair of bubbles moving through liquid (Part I). Eur. J. Mech., B/Fluids, 12 (4): 515-540.
- Legendre D., Magnaudet J. y Mougin G. 2003. Hydrodynamic interactions between two spherical bubbles rising side by side in a viscous liquid. J. Fluid Mech. 497: 133-166.
- Moore D. W. 1965. The velocity of rise of distorted gas bubbles in a liquid of small viscosity. J. Fluid Mech., 23(4): 749-766.
- Riboux G. 2007. Hydrodynamique d'un essaim des bulles en ascension. Tesis del Instituto de Mecánica de Fluidos de Toulouse, Francia.
- Van Wijngaarden L. 1997. On Pseudo Turbulence. Theoret. Comput. Fluid Dynamics. 10: 449-458.
- Zenit R. y Melany L. Hunt. 2000. Solid Fraction Fluctuation in Solid-Liquid Flows. International Journal of Multiphase Flow.
- Zenit R, Koch, D. L. and Sangani, A. S. 2001. Measurements of the average properties of a suspension of bubbles rising in a vertical channel. J. Fluid Mech. 429: 307-342.