

Estudio del flujo bifásico aire-líquido en tuberías verticales: Base de datos experimental para la validación de programas CFD.

G. Monrós, R. Martínez, S. Torro, S. Chiva, C. Peña*, JL Muñoz-Cobo***

Departamento de Ingeniería Mecánica y Construcción, Universitat Jaume I , Campus del Riu Sec, 12080, Castellón de la Plana

*Departamento de Ingeniería Química y Nuclear, Universitat Politècnica de València, Camino de Vera s/n, 46022 Valencia

gmonros@uji.es, torro@uji.es, schiva@uji.es, raul.martinez@uji.es, schiva@uji.es, cmonfer@upv.es, jlcobos@iqn.upv.es,

Introducción

Los flujos bifásicos se encuentran en multitud de procesos industriales en los que es muy importante la caracterización previa del flujo para el diseño, tanto desde el punto de vista de la eficiencia como de la seguridad. La correcta predicción del comportamiento de las interfases presentes en un flujos bifásicos requiere caracterizar previamente la estructura del flujo, para lo que es necesario conocer los principales parámetros locales que la caracterizan, como son la fracción de huecos, diámetros de partícula medios y área interfacial, así como su evolución temporal.

El estudio del comportamiento del flujo multifásico y su modelado ha sufrido un gran cambio con la introducción de los programas CFD, y el avance en los sistemas de medida. La resolución temporal y espacial de los programas de cálculo y la instrumentación se ha incrementado notablemente. Así, se hace indispensable disponer de nuevos resultados experimentales que permitan desarrollar nuevos modelos adaptados a estas capacidades, y a su vez validar las actuales herramientas de cálculo, especialmente los códigos CFD.

El objetivo principal de los resultados experimentales es su utilización como herramienta de validación y desarrollo de formulaciones tipo dos fluidos y códigos de simulación multifásicos. En el trabajo presentado se expone la metodología utilizada y resultados experimentales de los parámetros locales en un flujo agua-aire en configuración vertical, utilizando sensores de conductividad de 4 puntas para las medidas en la fase dispersa y anemometría láser para la fase continua.

1. Instalación experimental

Los experimentos han sido realizados en la Universitat Jaume I de Castellón, se trata de una instalación de flujo vertical con una sección de medida transparente (PMMA) circular de 52 mm de diámetro interior y 5500 mm de longitud, utilizando como fluidos de trabajo agua purificada ($\approx 30 \mu\text{S/m}$) y aire. Los límites de operación de la instalación son: para la fase líquida, velocidad superficial (j_l) hasta 8 m/s, y para la fase dispersa, velocidad superficial (j_g) hasta 0.9 m/s. El caudal circulante de fase líquida se mide utilizando un caudalímetro magnético (BADGER M100) y se controla mediante variador de frecuencia y sistema de by-pass con válvula pilotada (ajuste de precisión del caudal). Para el control y medida del caudal de la fase dispersa se utiliza un caudalímetro másico (Bronchost EL-FLOW 200). La temperatura de la fase líquida se mantiene controlada utilizando un intercambiador de tubos instalado en el tanque principal, consiguiendo temperaturas de 5 hasta 45 °C.

El proceso de mezclado de ambas fases se realiza en la entrada de la sección de medida en una cámara cónica de mezclado utilizando spargers de porosidad media 40 μm orientados en la dirección del flujo.

La separación de fases se realiza por gravedad mediante un depósito con difusor parabólico alineado con la salida de la sección de medida, con el objetivo de que la descarga se realice a presión atmosférica y a su vez evitar que afecte al flujo.

** *corresponding autor*

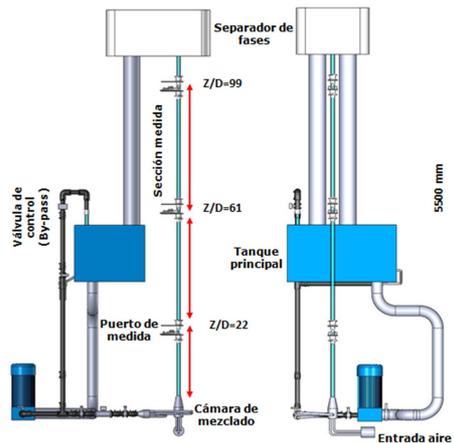


Figura 1. Esquema de la instalación experimental

La medición de los parámetros locales de la fase dispersa ha sido realizada utilizando sensores de conductividad de 4 puntas instalados en tres posiciones axiales de la sección de medida ($Z/D=22$, $Z/D=61$ y $Z/D=99$). La presión en la sección de medida se registra en los puertos de las sondas de conductividad y en la entrada ($Z/D=0$). Para la adquisición de las señales de voltaje de estos sensores se ha utilizado una tarjeta de adquisición de alta velocidad (National Instruments SCXI-1000). Para la medida de la velocidad de la fase continua se utiliza un sistema de anemometría láser de efecto doppler (LDA) que es posible desplazar hasta los 3 puertos de medida de las sondas de conductividad. El sistema consiste en un láser de 0.5W Ar+ Omnichrome de la marca Dantec®.

2. Medida de la fase dispersa

Para las medidas en la fase dispersa se utilizan sensores de conductividad de 4 puntas, con el objetivo de realizar la medida en distintas posiciones radiales. Para ello se ha utilizado un sistema de posicionamiento automático utilizando motores paso a paso que permite mover simultáneamente los 3 sensores instalados en el correspondiente puerto de medida. En los experimentos realizados se ha realizado un barrido radial de 15 posiciones (con menor espaciado cerca de la pared de la tubería) de forma que se adquieren los datos simultáneamente en los 3 puertos de medida.

Básicamente el sensor de conductividad de 4 puntas actúa como un detector de fase. Consiste en cuatro electrodos de cobre de 0.2 mm aislados totalmente excepto en el extremo. El cuerpo metálico del sensor se encuentra conectado a una fuente fija de voltaje y, debido a la diferencia de conductividad de las dos fases presentes (aire y agua) en cada una de las puntas del sensor se mide una variación de voltaje en función de la fase en contacto con el extremo conductor de cada uno de los electrodos (Figura 2).

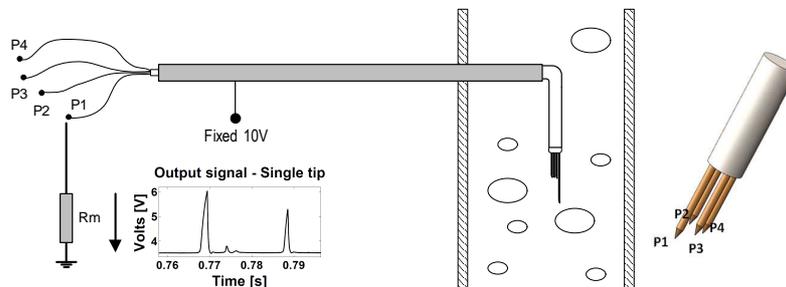


Figura 2. Esquema funcionamiento sensores 4 puntas.

2.1 Procesado de la señal

A partir del desfase y la duración de los picos entre las señales de voltaje de cada uno de los 4 electrodos es posible determinar tanto la fracción de huecos así como la velocidad de cada una de las interfases detectadas. Para ello es necesario procesar cada una de las señales mediante un proceso de binarización con el objetivo final de reconstruir una señal cuadrada normalizada para cada uno de los electrodos.

Principalmente el procesado de la señal consta de 3 etapas:

1. Adecuación de la señal: filtro de media móvil para eliminar el ruido de alta frecuencia y normalización del voltaje de cada uno de los electrodos.
2. Detección de las interfases: determinación del tiempo en que se inicia la variación de voltaje (inicio de burbuja) y determinación del tiempo en el que la señal empieza a decrecer (final de burbuja). Una vez obtenidos estos tiempos es posible regenerar la señal cuadrada ideal para cada uno de los electrodos.
3. Emparejamiento de las señales: se realiza la asignación de los tiempos de detección de interfase obtenidas con las cuatro puntas del sensor correspondientes a la misma burbuja mediante criterios de velocidad (considerando límites de rechazo en función de las velocidades máximas y mínimas esperadas para la fase dispersa). Se obtiene la señal cuadrada correspondiente a la señal de pulsos original (Figura 3).

La fase más crítica del procesado de la señal es la determinación (tiempo) de la interfase de llegada o frente de la burbuja, ya que de ello dependerá tanto la precisión en el cálculo de la fracción de huecos así como de la velocidad interfacial. En el punto de detección de la interfase el voltaje aumenta a diferente velocidad principalmente debido a que el sistema de medida (sensor y cableado) dista de ser completamente resistivo, por lo que un simple valor de corte (treshold) puede resultar poco preciso (Dias et al. [1]). Por ello se ha utilizado un ajuste exponencial de los valores de señal entre su voltaje base y un treshold auxiliar. Esto permite utilizar valores de treshold demasiado cercanos a la tensión de base que pueden falsear la medida por efecto del ruido de la señal.

Durante los experimentos realizados los rangos de velocidad interfacial se encuentran entre 0.2 y 5 m/s aproximadamente. Ante esta variabilidad de velocidades se ha utilizado una frecuencia de muestreo de 60kHz, con el objetivo de obtener suficiente resolución en el inicio de detección de la interfase.

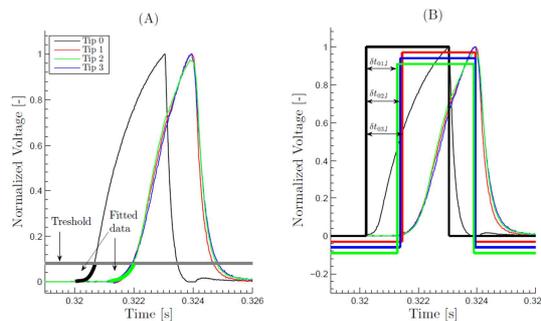


Figura 3. Procesado de la señal: (A) detección de la interfase mediante ajuste exponencial y treshold auxiliar. (B) Regeneración de la señal cuadrada y tiempos de retardo entre punta de referencia y auxiliares.

A partir de la señal cuadrada es posible obtener tres velocidades de las interfases de entrada (entre punta de referencia y puntas auxiliares), tiempo entre interfases (entrada y salida) correspondientes a la misma burbuja y el número total de burbujas detectadas en el tiempo muestreado.

En la Figura 4 se muestra la configuración típica de las puntas del sensor. Para asegurar la independencia de los resultados experimentales de la geometría del sensor, se han utilizado diferentes sensores para las mismas condiciones experimentales.

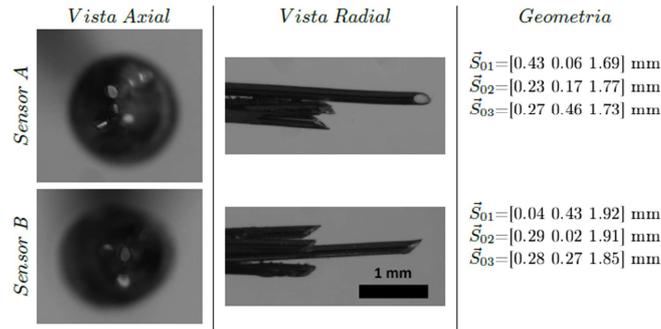


Figura 4. Detalle de las puntas del sensor y distancias entre puntas.

2.2 Cálculo de Parámetros locales

Utilizando sensores de conductividad de 4 puntas es posible medir los principales parámetros locales de la fase dispersa, como son:

- Fracción de huecos local promediada o void fraction.
- Velocidad interfacial.
- Concentración de área interfacial local promediada o local interfacial area concentration (IAC)
- Frecuencia de interfases detectadas (burbujas) radial.
- Longitud de cuerda de las burbujas o chord length.

Fracción de huecos o void fraction

La fracción media de huecos local es simplemente el tiempo durante el cual el sensor se encuentra expuesto a la fase gas (T_{gas}) dividido por el tiempo total de muestreo de la señal (Ω):

$$\bar{\alpha}(x) = \frac{T_{\text{gas}}}{\Omega}$$

El valor de T_{gas} se obtiene a partir de la punta de referencia ya que se entiende que es la punta en la que menos influencia tiene el sensor en el flujo.

Velocidad interfacial

A partir de la distancia y de la diferencia de tiempos en la detección de la interfase l entre la punta de referencia y las auxiliares es posible calcular 3 vectores velocidad independientes:

$$|\vec{V}_{0k,l}| = \frac{|\vec{S}_{0k}|}{\delta T_{0k,l}}, k = 1,2,3$$

Asumiendo que la distancia radial entre puntas es suficientemente pequeña comparada con el diámetro (equivalente) de las burbujas, se puede estimar la velocidad media axial de la fase dispersa en un punto radial como el promedio de los 3 vectores velocidad (baricentro) obtenidos:

$$|\vec{V}_z|(r) = \frac{1}{3} \sum_{i=1}^3 \frac{|\vec{V}_{01,l}| + |\vec{V}_{02,l}| + |\vec{V}_{03,l}|}{3}$$

Calcular la velocidad de la l interface de esta forma permite suavizar el efecto de la curvatura de la interfase.

Concentración de área interfacial (IAC)

La concentración de área interfacial se define como el área total disponible por unidad de volumen de la mezcla. A partir del trabajo de Kataoka et al. [2], que derivó la primera ecuación para la medida del IAC utilizando sensores de 4 puntas, y las posteriores aportaciones de Shen et al. [3,4,5] se establece que la

medida del IAC en un flujo bifásico tridimensional puede calcularse a partir del cálculo de la velocidad superficial normal a la superficie de la partícula ($\overrightarrow{V_{n,l}}$):

$$\bar{a}_i^t = \frac{1}{\Omega} \cdot \sum_{l=1}^{2N_t} \frac{1}{|\overrightarrow{V_{n,l}}|} = \frac{1}{\Omega} \cdot \sum_{l=1}^{2N_t} \sqrt{\frac{D_{01l}^2 + D_{02l}^2 + D_{03l}^2}{D_0^2}}$$

Siendo \bar{w} el tiempo total de muestreo y N_t el número total de interfases de entrada detectadas. $D_0, D_{01l}, D_{02l}, D_{03l}$ solamente dependen de los parámetros relativos de las puntas del sensor y el tiempo de retraso entre puntas en la detección de la interfase (Kataoka et al. [2]).

Es importante mencionar que el valor de $\overrightarrow{V_{n,l}}$ difiere de $\overrightarrow{V_z}$ debido a la curvatura de la burbuja. El primero es la velocidad normal a la superficie y el segundo es un promediado de la componente axial de la velocidad en 3 puntos de la superficie (sensores auxiliares), por tanto se utilizaran respectivamente para el cálculo del área interfacial y para la comprobación del caudal de aire.

Chord length

Para el cálculo del chord length se utiliza la velocidad interfacial normal a la superficie ($\overrightarrow{V_{n,l}}$) y el tiempo entre la detección de esta interfase de entrada ($T_{e,l}$) y la de salida ($T_{s,l}$), calculado con la punta de referencia:

$$C_l = |\overrightarrow{V_{n,l}}| \cdot (T_{s,l} - T_{e,l})$$

El chord length medio en cada una de las posiciones radiales se calcula como el valor medio de la PDF lognormal que mejor ajusta a la distribución obtenida:

$$\bar{C}_l = E\{f(C_l)\}$$

3. Resultados Experimentales: fase dispersa

La matriz de condiciones experimentales abarca un rango de jg de 0.02 m/s hasta 0.8m/s para 4 jl fijados a 0.5, 1, 2 y 3 m/s. La obtención de una condición experimental concreta se obtiene fijando un jl y jg deseado en el puerto de medida inferior ($Z/D=22$). Inicialmente se fija la velocidad de líquido deseada se empieza a incrementar el caudal de gas (corregido por presión en el puerto de medida) hasta obtener el jg deseado, modificando durante este proceso el caudal de líquido para mantenerlo estable en el valor de jl deseado. Se trata de un proceso iterativo controlado automáticamente con el software de control diseñado, que actúa sobre el variador de frecuencia de la bomba, la válvula de by-pass y el controlador de aire. Este procedimiento asegura una alta repetibilidad de los resultados.

La Figura 5 muestra los experimentos realizados para una temperatura de la fase líquida de 20°C, en la que se puede observar la transición de régimen bubbly (símbolos con relleno blanco) a slug (símbolos con relleno gris). Se han representado las condiciones en cada uno de los 3 puertos de medida $Z/D=22$ (\square), $Z/D=61$ (Δ) y $Z/D=99$ (\circ). Se observa que los resultados son coherentes con los criterios de transición propuestos por Taitel et al [6] (línea continua) y Mishima et al. [7] (línea a trazos).

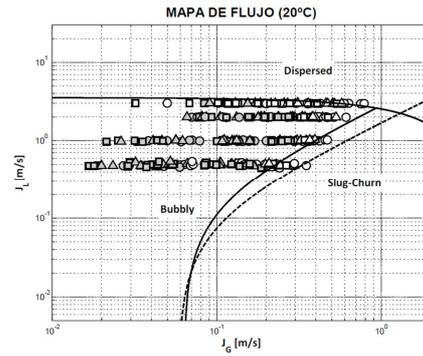


Figura 5. Mapa de flujo para las condiciones experimentales realizadas.

Uno de los objetivos en la elección de las condiciones experimentales ha sido, por una parte, poder observar la transición de bubbly a slug (o distribución wall-peak a distribución core-peak) de forma precisa con variaciones pequeñas de fracción de gas y además poder observar el efecto de la expansión de la fase gas en este proceso de transición.

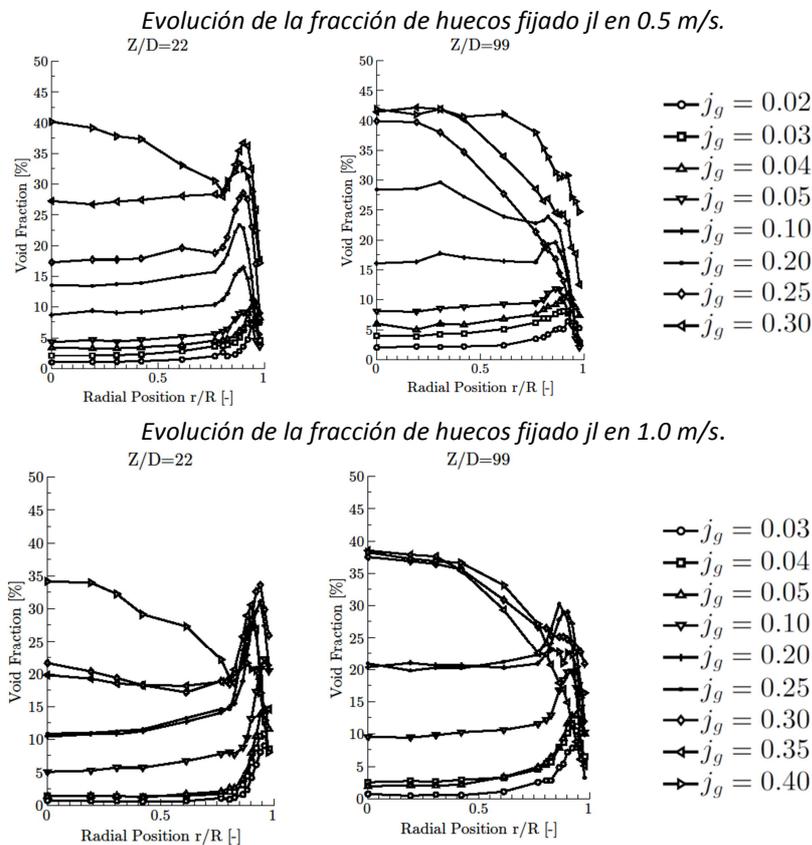


Figura 6. Evolución de la fracción de huecos en función del j_g para velocidades del fluido de 0.5 m/s y 1 m/s

Por claridad, se muestran los principales parámetros de flujo locales para las condiciones de velocidad superficial de líquido de j_l 0.5 m/s (trazo negro), j_l 1 m/s (trazo azul) i condiciones de velocidad superficial de gas j_g 0.05 m/s (o), j_g 0.10 m/s (□) y j_g 0.30 m/s (Δ).

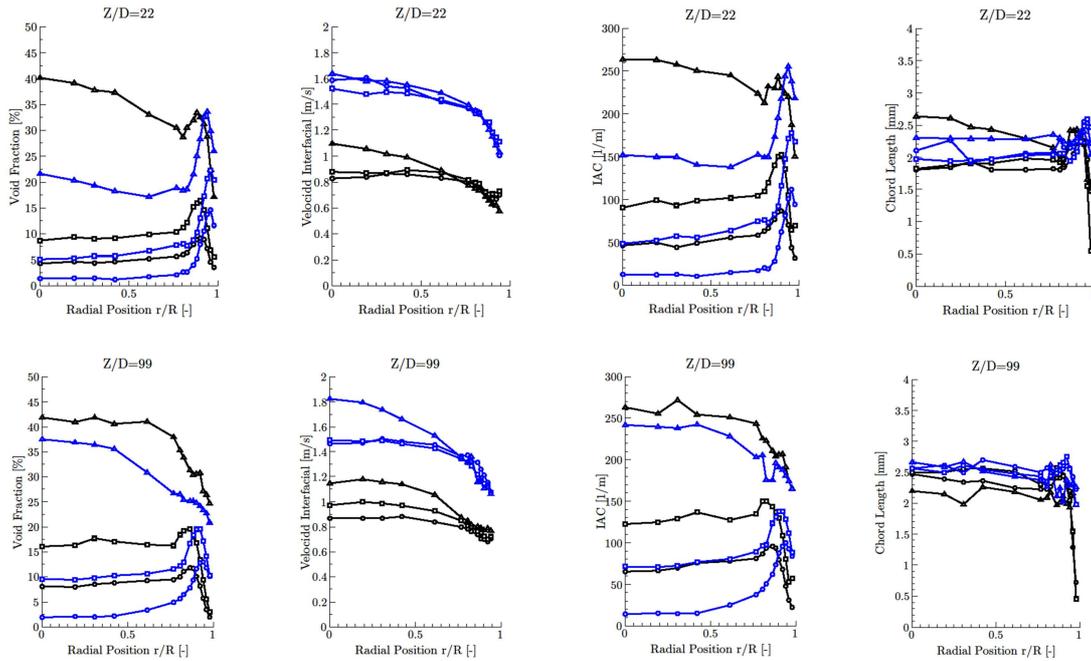


Figura 7. Comparación de la evolución de fracción de huecos radial [-], Velocidad Interfacial [m/s], densidad de área interfacial [1/m] y chord length [mm] en los puertos inferior z/D= 22 y superior z/D= 99 en las 15 posiciones radiales

En la figura 7 se observan las características básicas en régimen bubbly hasta transición como son:

- La transición a slug viene acompañada de un incremento de gas en la zona central de la tubería así como un incremento en la velocidad interfacial, debido a que las burbujas grandes tienden a migrar hacia el centro.
- El valor de área interfacial local es prácticamente proporcional al valor local de fracción de huecos, característico de régimen bubbly predominante. En régimen slug puro se esperaría un valor inversamente proporcional debido a la destrucción de área provocada por la coalescencia/creación de burbujas más grandes (slug).

Para la validación de los resultados, utilizando el valor de fracción de huecos total y la velocidad interfacial media obtenido del sensor de 4 puntas, se obtiene el valor de j_g promediado en la sección, que se compara con el valor medido con el caudalímetro de aire:

$$\langle j_g \rangle = \frac{1}{A} \int_0^R \bar{\alpha}(r) |\bar{V}_z|(r) 2\pi r dr$$

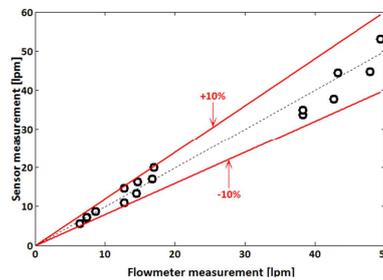


Figura 8. Validación de los resultados presentados a partir del caudal de gas medido.

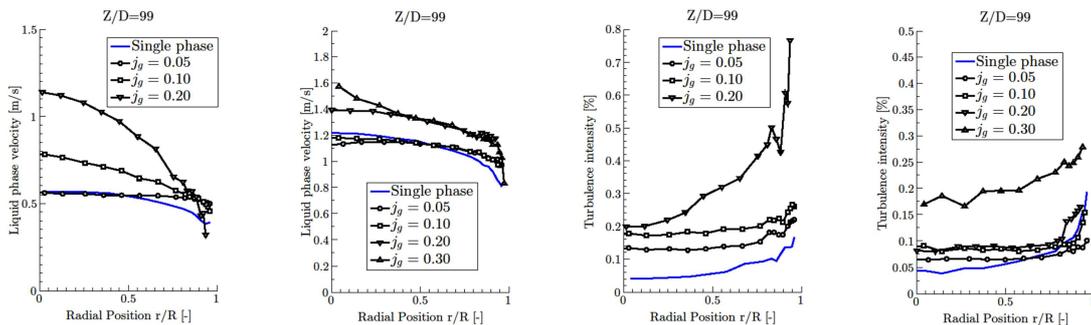
4. Resultados Experimentales: fase continua

Se han realizado medidas de velocidad e intensidad de turbulencia en la dirección axial con el objetivo de evaluar el efecto de la fracción de huecos.

La intensidad de turbulencia, o nivel de turbulencia se define como:

$$I = \frac{u'}{U}$$

Donde u' es la varianza de las fluctuaciones de la velocidad y U la velocidad media. Se han realizado medidas para las condiciones experimentales correspondientes a los sensores de conductividad en los 3 puertos axiales de medida. Por claridad y para asegurar que el flujo se encuentra totalmente desarrollado, se presentan en las figuras 13 y 14 los perfiles de turbulencia axial (I_z) y velocidad media axial obtenidos en $z/D=99$, para las condiciones de j_i 0.5 y 1 m/s respectivamente, ante variaciones de j_g que contemplan el efecto de la transición de bubbly a slug.



Evolución de los perfiles de velocidad de la fase continua a distintas velocidades superficiales de fase dispersa

Evolución de los perfiles de intensidad de turbulencia de la fase continua a distintas velocidades superficiales de fase dispersa.

Figura 9. Evolución de los perfiles de velocidad de la fase continua a distintas velocidades superficiales de fase dispersa.

Se observa en ambas configuraciones el efecto "aplanamiento" sobre el perfil de velocidad a bajas velocidad de gas para las dos configuraciones así como el gran incremento del nivel de turbulencia en la transición de wall-peak a core-peak (caso $j_i=0.5, j_g=0.2$ y $j_i=1, j_g=0.3$ m/s).

5. Conclusiones

Se han presentado los resultados experimentales obtenidos en una instalación experimental de flujo agua-aire en configuración vertical. Se ha expuesto la metodología (tipo de sensor y procesado de los datos experimentales) y validación utilizando sensores de conductividad de 4 puntas, con los que se ha caracterizado la fase dispersa, tanto la estructura como los principales parámetros locales. El efecto de la variación de las características de la fase dispersa se ha observado sobre la fase continua utilizando un sistema LDA.

Con todos los datos obtenidos se ha creado una base de datos que permite acceder a los datos, más de 200 casos, de forma sencilla y rápida. Con esta base de datos se puede calibrar los modelos que otros investigadores están desarrollando para el análisis de las fuerzas interfaciales y el comportamiento bifásico, y sobre todo servirá para poder testear los códigos CFD, los cuales precisan de datos detallados espacialmente, algo que hasta ahora no existe con tanto detalle y abundancia de casos en la literatura abierta.

6. Agradecimientos

Este trabajo se ha realizado gracias al Ministerio de Ciencia e Innovación (MCIIN), con los fondos del proyecto perteneciente al Plan Nacional I+D, ENE2010-21368-C02-02 y ENE2010-21368-C02-01.

7. Referencias

- [1] Dias, S. G., Franc, F. A., & Rosa, E. S. (2000). Statistical method to calculate local interfacial variables in two-phase bubbly flows using intrusive crossing probes, 26, 1797–1830.
- [2] Kataoka, M. Ishii, A. Serizawa. Local formulation of interfacial area concentration. *Int. J. Multiphase Flow*, 12 (1986), pp. 505–529
- [3] Shen, X., Mishima, K., & Nakamura, H. (2008). Error reduction, evaluation and correction for the intrusive optical four-sensor probe measurement in multi-dimensional two-phase flow. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 51(3-4), 882–895. doi:10.1016/j.ijheatmasstransfer.2006.01.054
- [4] Shen, X., & Nakamura, H. (2013). Local interfacial velocity measurement method using a four-sensor probe. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 67, 843–852. doi:10.1016/j.ijheatmasstransfer.2013.08.064
- [5] Shen, X., Saito, Y., Mishima, K., & Nakamura, H. (2005). Methodological improvement of an intrusive four-sensor probe for the multi-dimensional two-phase flow measurement. *International Journal of Multiphase Flow*, 31(5), 593–617. doi:10.1016/j.ijmultiphaseflow.2005.02.003
- [6] Taitel, Y. Bornea, D., and Dukler, A. E. (1980). Modeling flow pattern transitions for steady upward gas-liquid flow in vertical tubes. *AIChE J.*, 26, 345–354.
- [7] Mishima, K., and Ishii, M. (1984). Flow regime transition criteria for two-phase flow in vertical tubes. *Int. J. Heat Mass Transfer*, 27, 723–737.