

CHARACTERIZATION OF SLUG FLOW IN ANNULAR DUCT USING ADVANCED INSTRUMENTATION, PIV

CARACTERIZACIÓN DE FLUJO SLUG EN UN DUCTO ANULAR USANDO INSTRUMENTACION AVANZADA, PIV

PhD. Marlon Mauricio Hernández Cely¹, PhD. Oscar M H Rodriguez¹

¹ Industrial Multiphase Flow Laboratory (LEMI), Sao Carlos School of Mechanical Engineering, Universidad of São Paulo, Brazil. E-mail: marlonhc@usp.br

Abstract: An experimental study is presented, where air-water flow is studied in a 10.5-m-long annular duct with an external diameter of 155 mm and an inner diameter of 60 mm. Particle image velocimetry (PIV) is applied in order to obtain instantaneous velocity measurements of the flow field. The annular duct inclination is of 5° from the horizontal. One CCD camera (2448 pixel x 2050 pixel, 5 Mpixel, 12-bit) was positioned in the test section in order to record the seeding particles. The illumination was provided by a double pulsed PIV laser (Nd:YAG, frequency doubled to 532 nm) with a measured pulse intensity of 70 mJ/pulse. It was used at 15 Hz (resulting in the independence of the velocity samples). Based on the instantaneous local velocities, Probability Density Functions (PDF) and mean velocities are calculated. Air-water two-phase flow arranged in the slug-flow pattern is observed, at superficial velocities of $J_w = 0.153$ [m/s] and $J_a = 0.039$ [m/s]. 3000 samples per case are processed using a multi-pass multi-grid adaptive cross-correlation procedure. The new experimental results are of great value for comparison with CFD models and for the development of more refined pressure-drop prediction tools in two-phase annular-duct flow.

Keywords: PIV, Annular duct, Two-phase flow, Air-water flow, Velocity profile.

Resumen: Un estudio experimental es presentado, donde se estudió el flujo aire-agua en un ducto anular de 10,5 m de longitud con un diámetro externo de 155 mm e interno de 60 mm. Se aplica velocimetría de imagen de partículas (PIV) para obtener medidas de la velocidad instantánea del campo del flujo. La inclinación del conducto anular fue de 5° respecto a la horizontal. Se colocó una cámara CCD (2448 píxeles x 2050 píxeles, 5 megapíxeles, 12 bits de resolución) en la sección de prueba para registrar las partículas trazadoras. La iluminación fue proporcionada por un láser PIV de doble pulso (Nd: YAG, frecuencia duplicada a 532 nm) con una intensidad de pulso medida de 70 mJ / pulso. Se utilizó a 15 Hz (resultando en la independencia de las muestras de velocidad). Con base en las velocidades locales instantáneas, se calculan las funciones de densidad de probabilidad (PDF) y las velocidades medias. Se observa un flujo bifásico de aire-agua dispuesto en el patrón *slug-flow*, con velocidades superficiales de $J_w = 0.153$ [m/s] y $J_a = 0.039$ [m/s]. Se procesan 3000 muestras por experimento utilizando un procedimiento de correlación cruzada adaptativa de múltiples pasadas y múltiples mallas. Los nuevos resultados experimentales son de gran valor para el análisis con los modelos CFD y para el desarrollo de herramientas de predicción en caída de presión más refinadas en flujo de ductos anulares de dos fases.

Palabras clave: PIV, Ducto anular, Flujo bifásico, Flujo aire-agua, Perfil de velocidad.

1. INTRODUCCION

Los flujos de gas-líquido en conductos anulares concéntricos están presentes en muchas

aplicaciones industriales, por ejemplo, en las industrias direccional de refrigeración, nuclear y petroquímicas. Sin embargo, varias características de los flujos de dos fases, como los campos de velocidad y su relación con los patrones de flujo, aún no se comprenden completamente. El presente trabajo describe la aplicación de la velocimetría de imagen de partículas (PIV) en un flujo de dos fases aire-agua dispuesto en el patrón de *slug-flow* y en un gran ducto anular, donde densidad de probabilidad (PDF) y datos de velocidad instantánea fueron analizadas.

Se ha informado de un desarrollo significativo en las últimas dos décadas, Elseth, 2001, Kumara et al., 2010a y (Kumara et al., 2010b) realizaron trabajos sobre el flujo de tubería de dos fases agua-aceite, donde se analizaron las estadísticas de momento, como distribución de velocidad axial, raíz de los parámetros cuadrados medios (*rms*), tensores de Reynolds e la intensidad de turbulencia los cuales realizaron una comparación de los resultados obtenidos por PIV y Anemometría Láser Doppler (LDA) en un tubo horizontal de 15 m de largo y 56 mm de diámetro. Ayati et al., 2014, y Ayati et al., 2015, utilizaron PIV para medir un flujo aire-agua en el patrón estratificado en una tubería horizontal de 31 m de largo, 100 mm de diámetro y lo compararon con resultados de simulación numérica directa (DNS), con buena coherencia. Los perfiles de velocidad local y los perfiles de turbulencia en el plano vertical diametral se midieron utilizando PIV por Vestøl and Melaaen, 2007; el experimento se realizó con flujo aire-agua en una tubería de 14 m de largo, las propiedades de turbulencia se calcularon a partir de series de tiempo de medidas de velocidad. Birvalski et al., 2016, realizaron un estudio experimental en flujo estratificado-ondulado de aire y agua a través de una tubería horizontal de 5 cm de diámetro interior con una longitud total de 10 m utilizando PIV, se obtuvieron propiedades de turbulencia como perfiles axiales y radiales, perfiles de tensión de Reynolds y momentos transversales. Otro trabajo en flujo aire-agua fue presentado por Birvalski et al., 2014, en una tubería transparente de 50 mm de diámetro interior y 10,3 m de longitud, donde se midieron con PIV tensiones de Reynolds, velocidad radial media y velocidad axial media. Westerweel et al., 1996, y Toonder et al., 1997, analizaron estadísticas de turbulencia, utilizando DNS, PIV, LDA, comparando perfiles de velocidad axial media, intensidades de turbulencia axial y radial, tensión de Reynolds como función de la distancia adimensional desde la línea central de un flujo de tubería.

Pocos son los trabajos encontrados en la literatura similares usando PIV para obtener estadísticas de flujo de dos fases en *slug flow* y en un gran ducto anular concéntrico. En este trabajo se estudia un flujo bifásico aire-agua dispuesto en el patrón

slug-flow en un ducto anular concéntrico inclinado hacia arriba-5 grados. Se obtienen nuevos perfiles de velocidad mediante PIV sobre el plano vertical diametral en el lado inferior del ducto.

2. METODOLOGIA

2.1. Configuración de ducto anular

El PIV se instaló en un ducto anular con un diámetro externo de 155 mm y un diámetro interno de 60 mm, Fig. 1. La sección de prueba de 10,5 m de largo se instaló en una robusta viga de acero inclinable, de 11 m de largo, 60 cm de alto y 40 cm de ancho, que se puede inclinar de 0 a 90 grados desde la horizontal. La sección de prueba está formada por dos tubos ensamblados concéntricamente, los tubos externos e internos son de vidrio borosilicato y PVC, respectivamente. La Fig. 1. muestra, además de las secciones de prueba, todos los aparatos dedicados a la alimentación de fluido en el sistema. Un conjunto de bombas, convertidores de frecuencia, medidores y válvulas que permite realizar pruebas con una mezcla de diferentes combinaciones de agua y aire comprimido a diversas temperaturas y velocidades superficiales. El agua se almacenó en un tanque de 250 L, que estaba conectado a una bomba de desplazamiento positivo *Weatherford 2WHT53*. La bomba fue accionada individualmente por un variador de frecuencia. Se utilizó un inversor Vacon 0100-3L cuando se puso en marcha el motor de la bomba de agua. El sistema también incluía un compresor de tornillo compacto Schulz SRP-3030 (Fig. 1) acoplado a seis tanques de aire comprimido que actúan como el "pulmón" del sistema, almacenando el aire entre los ciclos de accionamiento del compresor para que el flujo de aire sea constante. El sistema contaba con un total de tres caudalímetros volumétricos para fase líquida (agua) divididos en diferentes rangos de caudal. Para medir la velocidad superficial del aire en la sección de prueba fue necesario medir el caudal másico de este aire en su cantidad. Para ello se utilizó un conjunto de tres caudalímetros volumétricos con un rango de medición de 1 a 1333 L/min en total. Para medir la fracción volumétrica de la mezcla en una determinada combinación de velocidades superficiales de las fases, se utilizó un sistema de válvulas de cierre rápido en la entrada y salida de la sección de prueba. Para la medición de gradientes de presión se dispuso de un total de 9 tomas de presión, donde se encontraba el instrumento de medida (*Endress-Hauser®*, modelo PMD-75). Cualquier combinación de estas salidas podría conectarse al manómetro diferencial a través de un colector. El circuito de flujo multifásico del Laboratorio de

Flujo Industrial Multifásico (LEMI) pertenece a la Escuela de Ingeniería de São Carlos de la Universidad de São Paulo (USP), Brazil.

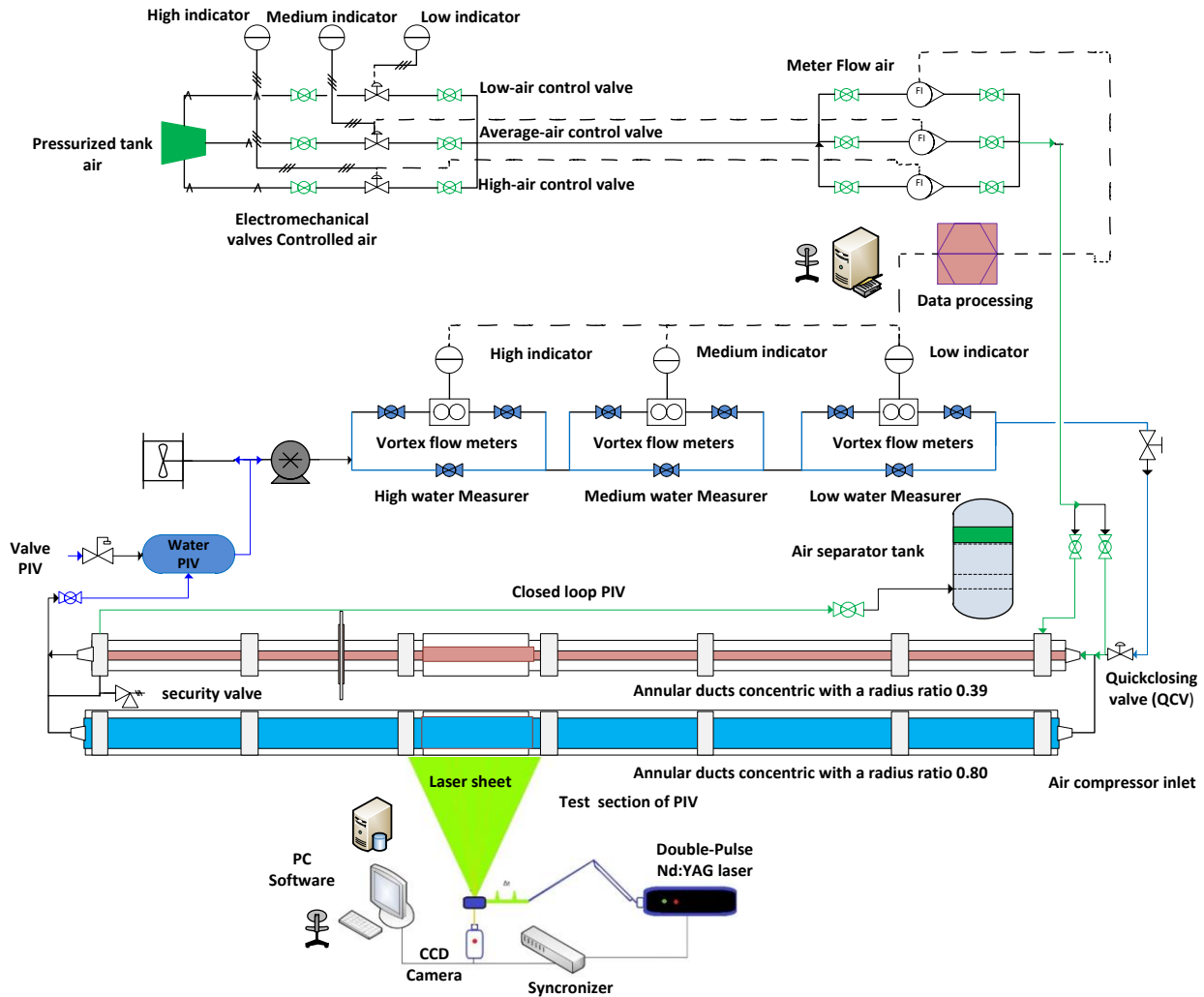


Fig. 1. Configuración del circuito experimental

2.2. Sistema PIV

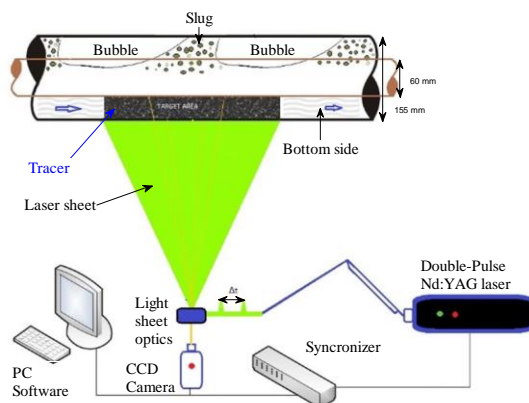
El sistema PIV consta de un láser, una cámara, una computadora de almacenamiento/análisis de datos y partículas trazadoras. El láser posee una longitud de onda de 512 nm y una potencia de iluminación de salida variable que permite la regulación de 0 a 80 mJ/pulso y es responsable por la iluminación de las partículas trazadoras, en nuestro caso esferas huecas de vidrio de 10 μm de diámetro. Una cámara CCD de alta resolución de 5 mega píxeles, registra pares de imágenes a una frecuencia de 14Hz, Fig. 2a y b. Se registraron un total de 1000, 4000, 3000 y 1500 pares de imágenes para los flujos laminar, turbulento, slug y estratificado, respectivamente.

Los intervalos de tiempo (dt) entre pulsos de láser para la respectiva grabación de las imágenes variaron en función del flujo analizado, para laminar fue de 2500 a 3000 μs, para turbulento de 300 a 1000, para slug 2500 μs y para estratificado 5000 μs, figuras 2a y b. El dt se determinó según la velocidad del fluido y el desplazamiento ds de las partículas entre los fotogramas A y B registrados por la cámara CCD, según el gradiente de velocidad y el tamaño dIntWin de la ventana de interrogación, Fig.2a y b (Keane and Adrian, 1991)

$$0.1 \text{ px} < ds < \frac{1}{4} d_{IntWin} \quad (1)$$

2.3. Procesamiento de imágenes

2a



2b

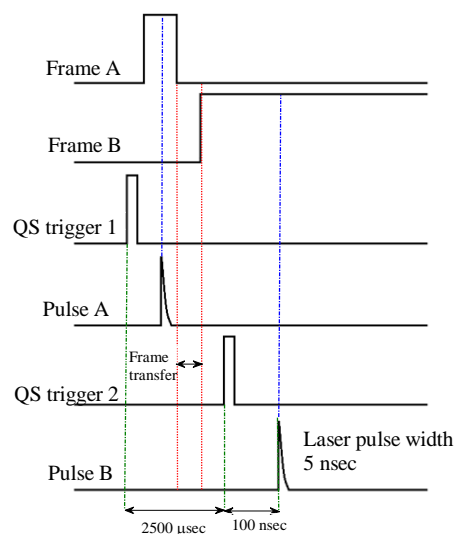


Fig. 2. Configuración de velocimetría de imágenes de partículas (PIV).

La calibración de la cámara se realizó con una rejilla insertada en tubo de cuadrados de 1 mm de diámetro, espaciados 1 mm, impresa en una hoja superior delgada y fijada a una placa de latón colocada en el plano de la hoja de luz. La calibración de la imagen de la cuadrícula fue tomada primero por la cámara con el conducto lleno de aire, después de lo cual la tubería se llenó de agua (sin mover la cuadrícula) y la cámara PIV tomó otra imagen. Las imágenes de calibración obtenidas se utilizaron para derivar una función de mapeo. Esto se hizo utilizando el software Davis 8 de LaVision. La función de mapeo corrige las imágenes capturadas (corrigiendo las distorsiones) y aplica una escala correcta. El procesamiento de PIV se realizó con el mismo paquete de software. Las 3000 imágenes PIV se procesaron utilizando un procedimiento de correlación cruzada adaptativa de múltiples pasadas y cuadrículas múltiples con el tamaño final del área de interrogación de 32x32 píxeles. Las áreas de interrogatorio se superpusieron en algunos casos en un 50% y en otros casos no se superpusieron. Finalmente, se aplicó un filtro de suavizado vectorial de 3x3. En promedio, el número de vectores interpolados no fue más de varios por ciento, siendo ligeramente menor cerca de la interfaz, y un poco más en la región cercana a la pared.

2.4. Perfiles de velocidad media según la posición PLb / 10

Para medir el perfil de velocidad media en cada posición debajo de la burbuja, cada cuadro representado por una burbuja se divide en cinco posiciones PLb / 10 (9Lb / 10, 7Lb / 10, 5Lb / 10, 3Lb / 10 y 1Lb / 10), donde el perfil de

velocidad de cada posición se calcula para cada fotograma. Después de eso, todos los perfiles de velocidad en cada posición se suman y se dividen en el número de cuadros, dando como resultado el perfil medio para las posiciones PLb / 10, según la ecuación (3). Este es el perfil de velocidad observado en la Fig.4.

3. RESULTADOS

3.1. PDF de la velocidad axial media Umean

Se pueden ver en la Fig. 3 las funciones de densidad de probabilidad (PDF) de las velocidades axiales medias, Umean, para velocidades superficiales del agua y del aire de $J_w = 0.153$ [m / s] y $J_a = 0.039$ [m / s], respectivamente. Los perfiles de velocidad media se midieron en el lado inferior del ducto anular sobre el plano vertical diametral. El patrón de flujo observado fue *slug flow*, con burbujas de aire alargadas que fluían en el lado superior del conducto anular, seguido de pistones de agua en los que se podían detectar burbujas dispersas. Todas las PDF de las velocidades axiales medias de la fase líquida mostraron distribuciones que se asemejan a una distribución gaussiana, Fig.3. Las velocidades medias relacionadas con los perfiles de velocidades axiales medias (Fig. 4) corresponden a la media de las distribuciones gaussianas (Fig. 3). Por ejemplo, en la posición 5Lb / 10, la velocidad axial media de Gauss y del perfil es la misma, -0.03734 m / s. Se tomó para cada uno de los 3000 cuadros, donde cada cuadro representa una burbuja.

En la Fig. 3, Ecuación (2) se utilizó para calcular la velocidad media U^* :

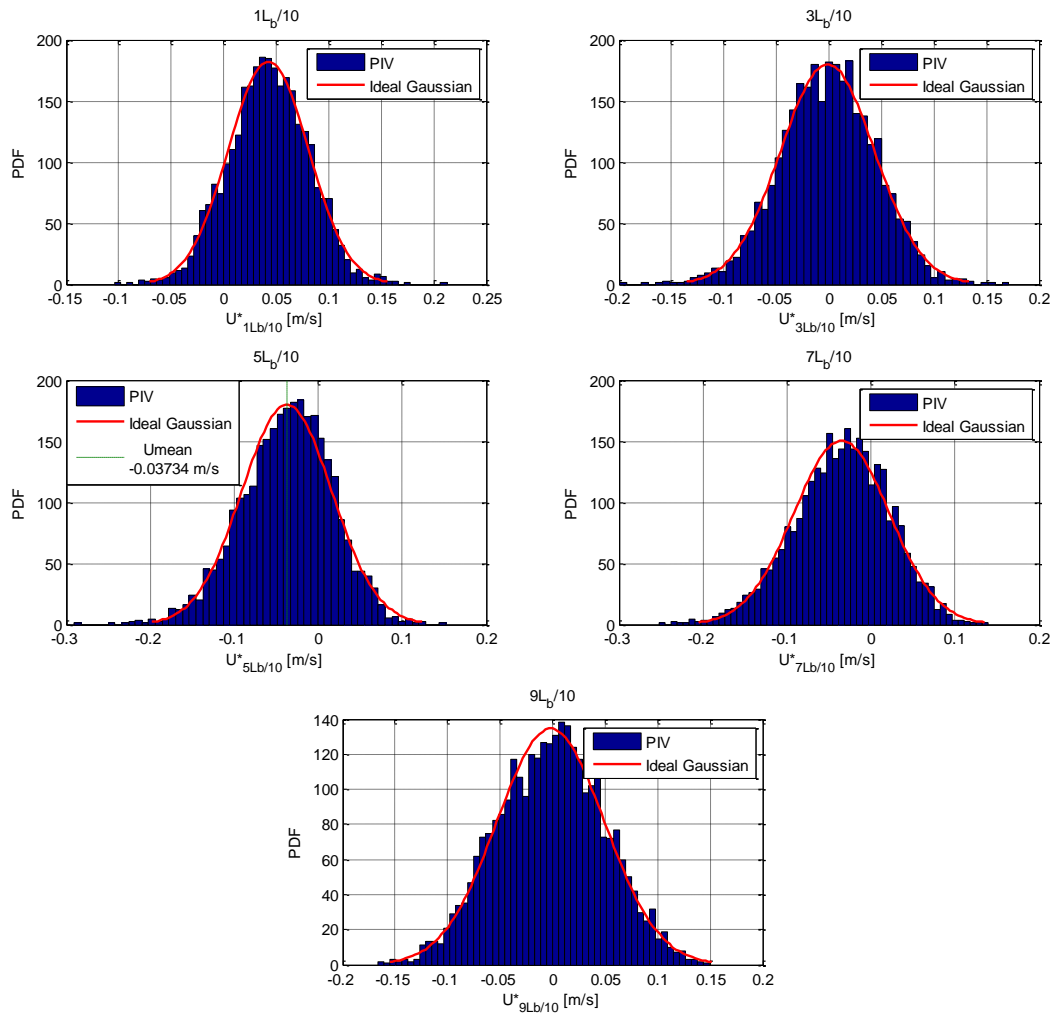


Fig 3. PDF de U_{mean} para varias posiciones de la burbuja en $J_w = 0.153$ [m/s] and $Ja = 0.039$ [m/s].

$$U^*_{PLb/10} = \frac{1}{N_p} \sum_{i=1}^{N_p} u_i \quad (2)$$

donde: U^* es la media del perfil de velocidad de cada cuadro, en diferentes posiciones $PLb / 10$, N_p es el número de puntos del perfil de velocidad PIV y u_i es un punto de este perfil.

3.2. Velocidades medias relacionadas con los perfiles de velocidad axial media U_{mean}

Para la condición de flujo mencionada, se tomaron 3000 cuadros de las burbujas. La burbuja media se dividió en cinco posiciones, donde su nariz se colocó como la primera y la cola como la última, ver Fig. 4. Conociendo la longitud media de la burbuja (Lb), las posiciones se determinaron como fracciones de Lb : $1Lb / 10$, $3Lb / 10$, $5Lb / 10$, $7Lb / 10$ y $9Lb / 10$. Las velocidades medias

relacionadas con los perfiles de velocidades axiales medias de la Fig. 4 corresponden a la media de las distribuciones gaussianas (Fig. 3). Por ejemplo, en la posición $5Lb / 10$, la velocidad axial media del gaussiano es -0.03734 m/s. Estos resultados interesantes significan que hay un reflujo promedio de agua en el lado inferior del conducto anular en el medio de la burbuja. En la Fig. 5 se pueden ver los cambios en los perfiles de velocidad media en función de la posición del flujo de slug de aire-agua en comparación con lo que cabría esperar del flujo de ducto anular monofásico. Los perfiles tienen diferentes formas en diferentes posiciones con respecto a la punta de la burbuja, mostrando que la velocidad media disminuye de 0.04259 m/s, en la punta ($1Lb / 10$), a -0.03734 m/s, en el medio, y luego aumenta a -0.001854 m/s en la cola ($9Lb/10$). Tal comportamiento de los perfiles de velocidad debería tener un efecto sobre los esfuerzos

cortantes y por tanto, sobre la caída de presión y da una idea de la complejidad del flujo estudiado.

Los perfiles se calcularon utilizando la Ecuación (3) y se grafican ($U_{mean\ profile}$) en la Fig.4:

$$U_{mean\ profile, PLb/10} = \frac{1}{N_f} \sum_{i=1}^{N_f} \quad (3)$$

donde: N_f es el número de cuadros, 3000 y U_i es el perfil de velocidad PIV para cada cuadro.

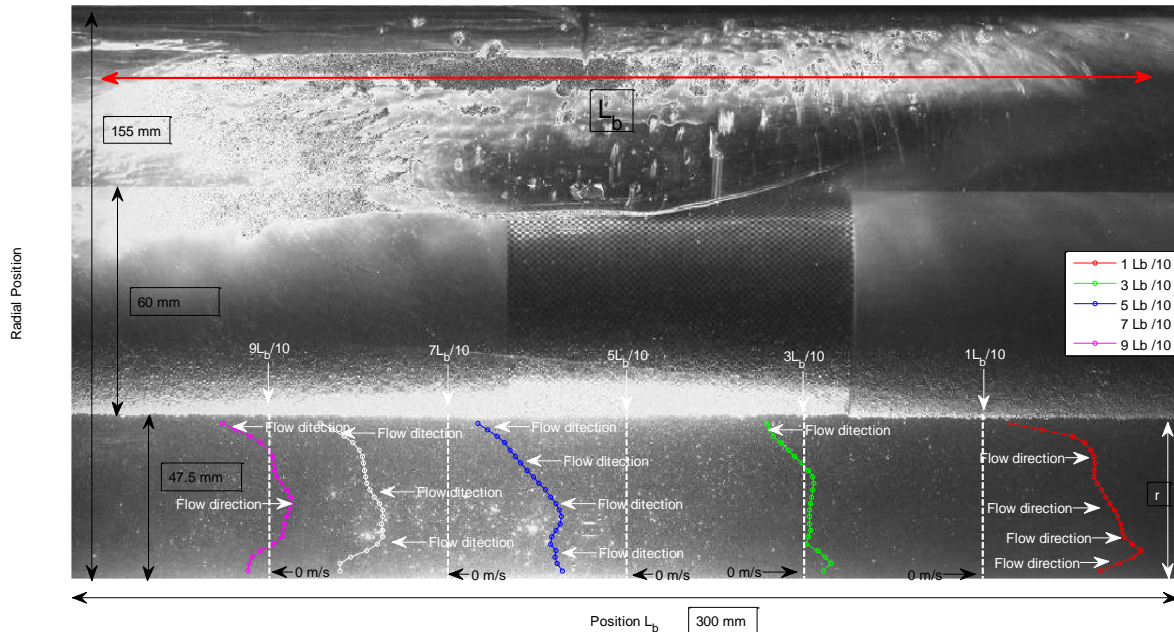


Figura 4. Burbuja que cruza la sección de visualización en la parte superior y perfiles de velocidad axial media sobre el plano vertical diametral en la parte inferior del ducto anular en diferentes posiciones con respecto a la punta de la burbuja para $Jw = 0.153 [m/s]$ y $Ja = 0.039 [m/s]$.

4. RECONOCIMIENTO

Los autores desean agradecer a STATOIL y ANP por el apoyo financiero y al CNPq y FAPESP por las becas de investigación.

5. CONCLUSIONES

El flujo bifásico de aire-agua dispuesto en el patrón de *slug-flow* en un ducto anular concéntrico inclinado hacia arriba se estudia mediante PIV. Se obtienen nuevos perfiles de velocidad sobre el plano vertical diametral en el lado inferior del ducto. Los perfiles tienen diferentes formas en diferentes posiciones con respecto a la punta de la burbuja. El complejo comportamiento de los perfiles de velocidad en función del espacio debería tener un efecto sobre los esfuerzos cortantes y por tanto, sobre la caída de presión.

Según el conocimiento de los autores, esta información no está disponible en la literatura abierta y es de gran importancia para el desarrollo de códigos numéricos que apuntan al desarrollo de modelos de predicción de caída de

presión de dos fases en ductos anulares concéntricos.

REFERENCIAS

- Ayati, A.A., Kolaas, J., Jensen, A., Johnson, G.W., 2015. Combined simultaneous two-phase PIV and interface elevation measurements in stratified gas/liquid pipe flow. *International Journal of Multiphase Flow* 74, 45–58. <https://doi.org/10.1016/j.ijmultiphaseflow.2015.03.024>
- Ayati, A.A., Kolaas, J., Jensen, A., Johnson, G.W., 2014. A PIV investigation of stratified gas-liquid flow in a horizontal pipe. *International Journal of Multiphase Flow* 61, 129–143. <https://doi.org/10.1016/j.ijmultiphaseflow.2014.01.008>
- Birvalski, M., Tummers, M.J., Delfos, R., Henkes, R.A.W.M., 2014. PIV measurements of waves and turbulence in stratified horizontal two-phase pipe flow. *International Journal of Multiphase Flow* 62, 161–173.

- <https://doi.org/10.1016/j.ijmultiphaseflow.2014.03.001>
- Birvalski, M., Tummers, M.J., Henkes, R.A.W.M., 2016. Measurements of gravity and gravity-capillary waves in horizontal gas-liquid pipe flow using PIV in both phases. *International Journal of Multiphase Flow* 87, 102–113. <https://doi.org/10.1016/j.ijmultiphaseflow.2016.09.003>
- Elseth, G., 2001. An Experimental Study of Oil / Water Flow in Horizontal Pipes Department of Technology (HiT-TF) Telemark University College Kjølnes Ring , N-3914 Porsgrunn 270.
- Keane, R.D., Adrian, R.J., 1991. Optimization of particle image velocimeters: II. Multiple pulsed systems. *Measurement Science and Technology* 2, 963–974. <https://doi.org/10.1088/0957-0233/2/10/013>
- Kumara, W.A.S., Elseth, G., Halvorsen, B.M., Melaaen, M.C., 2010a. Comparison of Particle Image Velocimetry and Laser Doppler Anemometry measurement methods applied to the oil-water flow in horizontal pipe. *Flow Measurement and Instrumentation* 21, 105–117. <https://doi.org/10.1016/j.flowmeasinst.2010.01.005>
- Kumara, W.A.S., Halvorsen, B.M., Melaaen, M.C., 2010b. Particle image velocimetry for characterizing the flow structure of oil-water flow in horizontal and slightly inclined pipes. *Chemical Engineering Science* 65, 4332–4349. <https://doi.org/10.1016/j.ces.2010.03.045>
- Toonder, J.M.J., Hulsen, M.A., Kuiken, G.D.C., Nieuwstadt, F.T.M., 1997. Drag reduction by polymer additives in a turbulent pipe flow: numerical and laboratory experiments. *Journal of Fluid Mechanics* 337, 193–231. <https://doi.org/10.1017/S0022112097004850>
- Vestøl, S., Melaaen, M., 2007. PIV and gamma measurements of stratified unprocessed gas flow in a horizontal and near horizontal test pipe. *Multiphase Production Technology* 237–250.
- Westerweel, J., Draad, A.A., van der Hoeven, J.G.T., van Oord, J., 1996. Measurement of fully-developed turbulent pipe flow with digital particle image velocimetry. *Experiments in Fluids* 20, 165–177. <https://doi.org/10.1007/BF00190272>