

Evaluación del comportamiento de una sonda aire-agua en un banco de calibración de equipos de medición de flujos bifásicos

Assessment of the performance of an air-water probe on a calibration bench for two-phase flow measurement equipment

Alicia Ros-Bernal ^{a1*}, José M. Carrillo ^{a2}, Juan T. García ^{a3} y Luis G. Castillo ^{a4}

^aEscuela Técnica Superior de Ingeniería de Caminos, Canales y Puertos y de Ingeniería de Minas, Universidad Politécnica de Cartagena (UPCT), Paseo Alfonso XIII, 52, 30203, Cartagena, España.

E-mail: ^{a1}alicia.ros@upct.es, ^{a2}jose.carrillo@upct.es, ^{a3}juan.GBermejo@upct.es, ^{a4}luis.castillo@upct.es

*Autor para correspondencia

Recibido: 12/07/2023

Aceptado: 11/10/2023

Publicado: 31/10/2023

Citar como: Ros-Bernal, A., Carrillo, J.M., García, J.T., Castillo, L.G. 2023. Assessment of the performance of an air-water probe on a calibration bench for two-phase flow measurement equipment. *Ingeniería del agua*, 27(4), 269-281. <https://doi.org/10.4995/la.2023.20038>

RESUMEN

A pesar de los avances significativos logrados en el estudio de los flujos bifásicos agua-aire, existen dudas acerca de la precisión de las campañas experimentales puesto que los equipos suelen obviar la fase de calibración. Las limitaciones inherentes a las técnicas de medición existentes han impulsado la presente investigación. El objetivo de este trabajo es profundizar en el conocimiento del funcionamiento de una sonda de fibra óptica de doble punta, ensayada en un banco de calibración con una fracción de vacío del 32.13%. Para alcanzar esta concentración se ha utilizado un caudal de agua $Q_w = 2.26$ L/s y un caudal de aire $Q_a = 1.07$ L/s. La evolución de las principales variables ha sido analizada en la dirección transversal del chorro, considerando diferentes secciones a distintas distancias respecto a la salida de la tobera. Estas variables incluyen: la fracción de vacío, la frecuencia de cambio de fase, la velocidad, y el diámetro medio de las burbujas de Sauter.

Palabras clave | flujo bifásico, banco de calibración, sonda aire-agua, fibra óptica.

ABSTRACT

Despite significant advances in the study of two-phase water-air flows, there are doubts about the accuracy of experimental campaigns, as equipment often tend to ignore the calibration phase. The limitations inherent in existing measurement techniques have driven the present research. The aim of this work is to deepen the understanding of the operation of a dual-tip optical fiber probe, tested on a calibration bench with a void fraction of 32.13%. To achieve this concentration, a water flow rate of $Q_w = 2.26$ L/s and an air flow rate of $Q_a = 1.07$ L/s were used. The evolution of the main variables has been analyzed in the transverse direction of the jet, considering cross-sections located at different distances from the nozzle outlet. These variables include void fraction, phase change frequency, velocity, and Sauter mean bubble diameter.

Key words | two-phase flow, calibration bench, air-water probe, optical fiber.

INTRODUCCIÓN

Para mejorar la eficiencia de las estructuras hidráulicas que funcionan en condiciones de flujo bifásico aire-agua se recurre a la experimentación en modelos a escala debido a la dificultad de medir en prototipos. La calibración y validación de los equipos de medida de flujos bifásicos constituye un paso previo fundamental a la toma de medidas. La necesidad de contar con equipos de medición fiables para caracterizar el complejo flujo aire-agua, ha motivado los objetivos de diversas investigaciones, buscando desarrollar técnicas para la medición local de concentraciones de aire y velocidades de forma precisa. Ejemplos de equipos de medición puntuales empleados en este tipo de flujo son: sondas de conductividad, sondas de fibra óptica, y tubos de Pitot con sistema a contracorriente (Frizell *et al.*, 1994; Nagash, 1994; Chanson, 2002). En la Tabla 1 se describen las características generales de cada equipo:

Tabla 1 | Equipos de medición puntuales habitualmente empleados en flujos aire-agua.

	Principio básico de funcionamiento	VARIABLES A OBTENER	Precauciones a tener en cuenta
Sonda de conductividad.	Identificación de la fase aire/agua en función de la conductividad eléctrica al atravesar el medio.	Fracción de vacío; frecuencia de cambio de fase; velocidad media (requiere sonda de 2 puntas).	La caracterización estadística de la velocidad requiere que una misma burbuja pase por las dos puntas, existiendo problemas en zonas de recirculación; se recomienda emplear frecuencias de muestreo superiores a 20 kHz.
Sonda de fibra óptica.	Identificación de la fase aire/agua en función del índice de difracción al pasar de un medio a otro.	Fracción de vacío; frecuencia de cambio de fase; velocidad media (requiere sonda de 2 puntas).	La caracterización estadística de la velocidad requiere que una misma burbuja pase por las dos puntas, existiendo problemas en zonas de recirculación; fragilidad de las puntas.
Tubo de Pitot con sistema a contracorriente.	Principio de Bernoulli, considerando la presión estática y dinámica registradas; el sistema a contracorriente evita la entrada de burbujas de aire al sistema neumático.	Velocidad media; presión estática.	El tubo de Pitot debe estar alineado con una línea de corriente; se debe corregir la expresión de la velocidad media en función de la fracción de vacío local.

Con el fin de lograr una calibración precisa de estos equipos, es necesario someterlos a pruebas en bancos de calibración especializados. Entre las configuraciones reportadas en la bibliografía destaca la propuesta por Frizell *et al.* (1994). El dispositivo de calibración empleado por los autores se compone de un sistema de tuberías dispuestas en forma de “U” invertida, donde el caudal de agua se suministra al sistema de tuberías en el tramo ascendente, mientras que la línea de aire se conecta a la tubería de agua en el tramo descendente del sistema. La salida del chorro se produce a través de una tobera de menor diámetro y longitud 10 cm. Esta instalación fue empleada para la calibración de un tubo de Pitot con sistema a contracorriente para evitar la entrada de burbujas en el sistema neumático, y una sonda de conductividad, ambos equipos desarrollados por el U.S. Bureau of Reclamation para evaluar la disipación de energía en el prototipo de un aliviadero escalonado en Colorado. Posteriormente, este banco de calibración fue empleado por Matos y Frizell (1997) con el propósito de calibrar una readaptación de la sonda de conductividad del U.S. Bureau of Reclamation para su aplicación en el modelo a escala reducida de un aliviadero escalonado ubicado en el Laboratorio Nacional de Ingeniería Civil (LNEC) de Portugal.

Borges *et al.* (2010), basándose en los principios de funcionamiento planteados por Bachmeier (1988) y Frizell *et al.* (1994), desarrollaron un dispositivo de calibración para probar y calibrar una sonda combinada de presión y conductividad que permitía medir tanto velocidades como fracciones de vacío. El banco estaba formado por una tubería de metacrilato de 60 mm de diámetro interior por cuya parte superior se suministraba un caudal constante de agua y se inyectaba aire comprimido a través de un tubo poroso para favorecer la mezcla entre ambas fases. Adicionalmente, la mezcla de aire y agua pasaba por varias mallas de acero inoxidable para homogeneizar el flujo hasta que alcanzaba una tobera de salida de 20 mm de diámetro dispuesta al final de la tubería principal. La fracción de vacío del banco de calibración se obtuvo mediante la siguiente expresión:

$$C_{\text{banco}} = \frac{Q_{\text{aire}}}{Q_{\text{agua}} + Q_{\text{aire}}} \quad (1)$$

siendo C_{banco} la fracción de vacío de la mezcla, mientras que Q_{aire} y Q_{agua} son el caudal de aire y agua inyectados al banco de calibración, respectivamente.

En la actualidad, se disponen de múltiples metodologías de medición aplicables al estudio de flujos bifásicos aire-agua, cuyo funcionamiento óptimo varía según el tipo de flujo y la fracción de vacío (Boyer *et al.*, 2002). Los diferentes estudios realizados consideran que para concentraciones de vacío superiores al 1-3%, las técnicas de detección de fase intrusivas brindan los resultados más fiables, entre las cuales destacan la sonda de conductividad y la sonda de fibra óptica (Cartellier y Achard, 1991; Bachalo, 1994; Chanson, 2002).

Frizell *et al.* (1994), Matos y Frizell (1997), Borges *et al.* (2010) y Ortega (2021) destacan la importancia de la fase de calibración de estos instrumentos de medición, antes de su uso en instalaciones de laboratorio o a gran escala, con la finalidad de evaluar el diseño y comportamiento de la sonda, garantizando así la fiabilidad de los resultados alcanzados. La curva de calibración obtenida por estos autores (Figura 1) reafirma la necesidad de seguir trabajando en esta línea para lograr mayor exactitud y desempeño de los equipos, pues estos tienden a subestimar la fracción de vacío cuando se presentan pequeñas concentraciones de aire en la mezcla, pudiendo llegar a sobreestimar su valor ante altas concentraciones de aire.

Algunos autores han analizado la influencia de otros parámetros en la caracterización de la fracción de vacío. Por ejemplo, para una sonda de conductividad, Felder y Chanson (2015) recomiendan emplear frecuencias de muestreo de al menos 20-40 kHz para reducir errores en la estimación de la fracción de vacío, la frecuencia de cambio de fase, y las variables derivadas. En realidad, la frecuencia de muestreo a emplear depende de las características de la parte sensible de la sonda (forma y dimensiones de la parte que actúa de elemento conductor), la velocidad del fluido, y el tamaño de las burbujas a caracterizar. Así, para una sonda dada, a igualdad de condiciones de los otros parámetros, una frecuencia de muestreo más elevada permite caracterizar menores tamaños de burbujas, o caracterizar flujos con mayor velocidad. Sin embargo, se debe alcanzar un compromiso entre frecuencia de muestreo, duración de la medición y nivel de caracterización respecto al número de datos registrados que deben ser procesados.

Respecto a la medición con dos puntas para estimar la velocidad media del flujo, Cain (1978) realizó un estudio pionero donde se desarrolló una sonda de conductividad de doble punta con el propósito de obtener datos de velocidad en el vertedero de la presa de Aviemore (Nueva Zelanda). Sin embargo, el uso de sondas de fibra óptica de doble punta en la medición hidráulica es una práctica más reciente, documentada por Boes y Hager (1998). Su desempeño las convierte en la elección más adecuada para abarcar una amplia gama de fracciones de vacío, frecuentes en flujos de lámina libre (Chanson, 2002; 2016; Valero y Bung, 2018). En cuanto a sus limitaciones, radica la necesidad de conocer previamente la dirección del flujo a fin de conseguir una correcta alineación de las puntas de la sonda con esta dirección (Matos *et al.*, 2002).

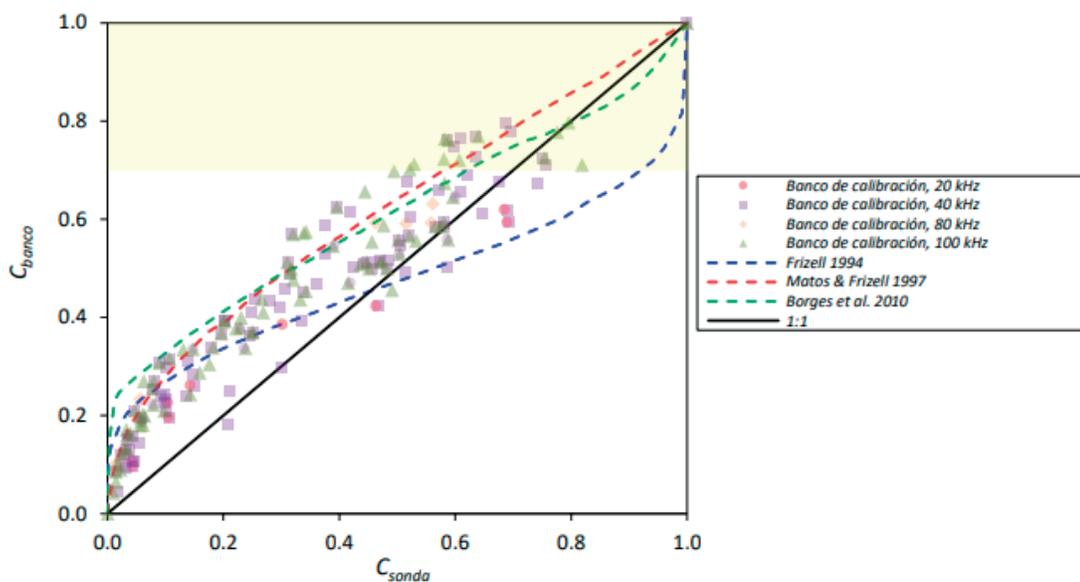


Figura 1 | Curva de calibración (relación aire/agua) de una sonda de conductividad ensayada en un banco experimental junto a los resultados obtenidos por diversos investigadores (Ortega, 2021).

Según Hohermuth *et al.* (2021), la interacción de una burbuja con las dos puntas de una sonda pasa por distintas etapas. Partiendo de un flujo no perturbado aguas arriba de la sonda, cuando una burbuja alcanza la primera punta, su primera interfaz sufre deformaciones significativas. Lo mismo ocurre con la segunda interfaz, aunque en menor medida dada la naturaleza hidrofílica de las puntas de las sondas. En este sentido, cuando la burbuja alcanza la segunda punta, es una burbuja previamente deformada, que continúa deformándose al ser atravesada nuevamente (Figura 2). Consecuentemente, los tiempos de viaje registrados, entre la detección de la primera y segunda interfaz de la burbuja, por la punta principal y secundaria, difieren.

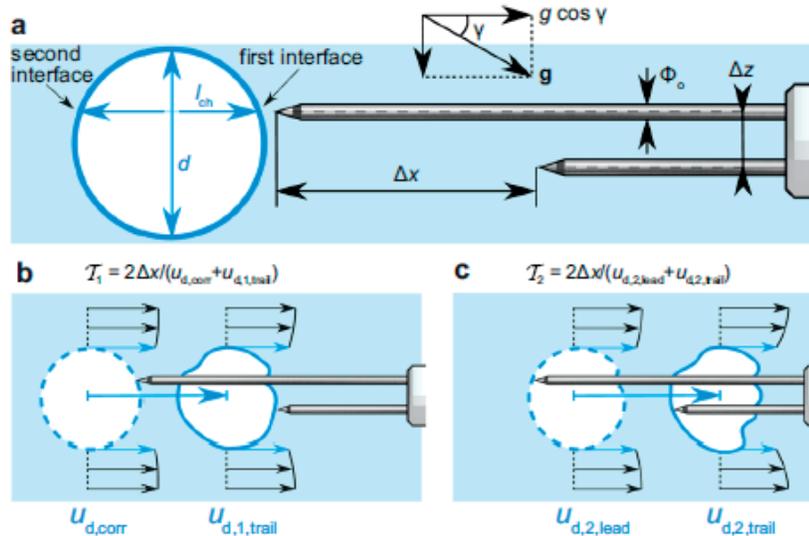


Figura 2 | Proceso de interacción burbuja-sonda de dos puntas (Hohermuth *et al.*, 2021).

El tiempo de viaje más probable de las interfaces entre la primera y segunda punta se obtiene, típicamente, mediante un análisis de correlación cruzada, que estudia la relación entre las dos señales y determina el desplazamiento temporal que proporciona la mejor correlación entre ellas. El coeficiente de correlación es función de la tasa de muestreo, de la separación transversal entre las puntas, de la desalineación de las puntas respecto a la dirección del flujo y de la interacción burbuja-sonda. Su valor se obtiene al comparar los instantes de los registros temporales en los que ambas puntas, principal y secundaria, se encuentran inmersas en aire. Conocida la separación entre las dos puntas en la dirección del flujo, el desfase temporal entre las dos señales permite la estimación de las velocidades medias, promediadas durante el período de muestreo.

Recientemente, Kramer *et al.* (2019) emplearon una técnica conocida como Correlación Cruzada Adaptativa de Ventana (AWCC, por sus siglas en inglés) que permite obtener series de tiempo de velocidades pseudo-instantáneas en sondas de conductividad. La principal innovación de la técnica AWCC radica en dividir las señales de las sondas en ventanas muy cortas, en función del número específico de partículas de fase dispersa (N_p) contenidas en un segmento dado de la señal registrada, y en estimar así una velocidad pseudo-instantánea para cada ventana. Si bien, los equipos comerciales de fibra óptica cuentan con una estimación de velocidad pseudo-instantánea similar, en ambos casos se deben considerar las dificultades para validar dichas mediciones.

El método convencional es adecuado para flujos aire-agua con una dirección de flujo predominante, pero puede resultar en sobreestimaciones de la velocidad dentro de la capa de corte y no permite la detección de fluctuaciones y velocidades cercanas a cero. Por otro lado, la técnica AWCC proporciona estimaciones más consistentes de velocidades y niveles de turbulencia, especialmente en flujos de capa de corte, pero puede requerir mejoras en la interacción burbuja-sonda (Kramer *et al.*, 2020).

Estas sondas de detección de fase presentan limitaciones debido a la intrusividad de sus puntas. Esto puede resultar en diferentes sesgos de velocidad, que incluyen el sesgo estadístico, el sesgo por desalineamiento y el sesgo por interacción burbuja-sonda. Hohermuth *et al.* (2021) observaron que las interacciones burbuja-sonda conducen a una subestimación de la velocidad real de la burbuja debido a la tensión superficial y formulan un método de corrección basado en un equilibrio de fuerzas en la burbuja.

Así, según lo expuesto, se evidencia la necesidad de seguir investigando y mejorando las técnicas existentes, explorando nuevas formas de abordar los desafíos presentes en el campo de estudio. Este artículo pretende contribuir con ello mediante el análisis y validación de los datos medidos en un banco de calibración de flujo bifásico por una sonda de fibra óptica, evaluando su desempeño para distintas fracciones de vacío.

MATERIAL Y MÉTODOS

El Laboratorio de Hidráulica de la Universidad Politécnica de Cartagena se encuentra equipado con un sistema diseñado para la calibración de equipos de medida de flujos bifásicos aire-agua (Figura 3). El banco de ensayos consiste en un sistema presurizado alimentado mediante dos circuitos independientes, de agua y aire respectivamente, que proporcionan sendos caudales de operación de forma controlada y constante, actuando sobre el variador de frecuencia de la bomba de agua o la presión de la línea de aire. El caudalímetro electromagnético de agua es un equipo de la marca YOKOGAWA, modelo AXW080-GA000AE2HL214B1JA11/GRN/EC, de diámetro $\phi = 110$ mm y tolerancia $\pm 0.5\%$. Por otro lado, el caudalímetro de aire es de la marca CS Instruments GmbH & Co. KG, modelo VA520, de diámetro $\phi = 32$ mm y tolerancia $\pm 1.5\%$, con corrección automática de la medición según la temperatura del aire.

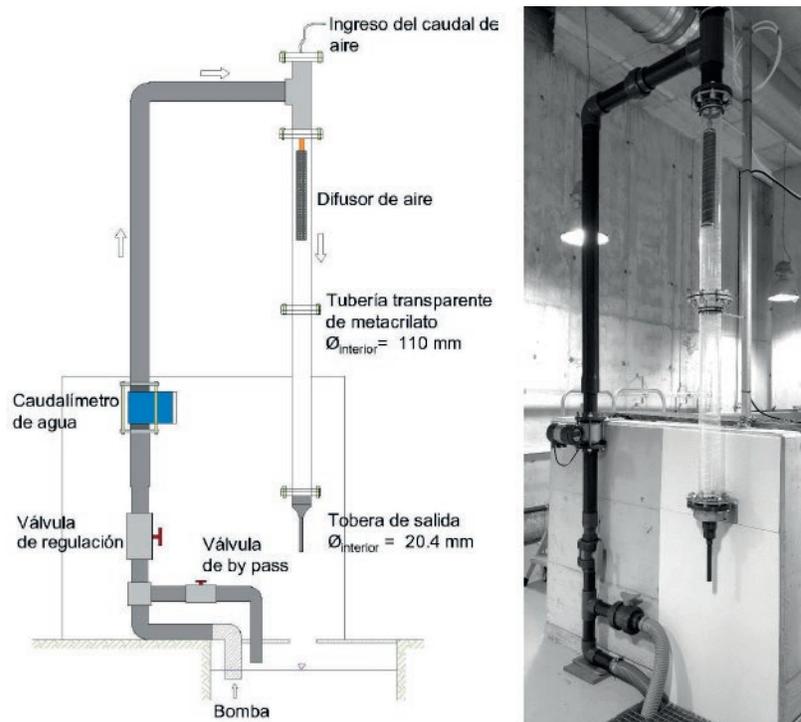


Figura 3 | Banco de calibración para flujos bifásicos aire-agua (Ortega, 2021).

Ambos fluidos ingresan a una tubería de metacrilato transparente compuesta por la unión de dos tubos de 1 m de longitud y 110 mm de diámetro que permiten la visualización de los patrones de flujo, en función de la concentración de cada fase, que abarcan desde un flujo no aireado hasta un flujo anular. La entrada de aire se ubica en la parte superior e incluye un difusor de aire, propiciando así un flujo descendente a lo largo de la tubería de longitud suficiente para favorecer el desarrollo de una mezcla homogénea de ambos fluidos. Previa a la salida, se produce una contracción gradual de la sección hasta alcanzar el diámetro interior de la tobera de salida de 20.4 mm y longitud equivalente a 15 diámetros. El banco de calibración ha sido empleado en trabajos anteriores para la calibración y validación de sondas de conductividad, alcanzándose concentraciones de aire de hasta el 75% y velocidades medias de salida del flujo de hasta 20 m/s (Ortega, 2021).

En este estudio se trabajará con sondas de fibra óptica para seguir ahondando en el conocimiento de los sistemas de medición, analizando en este caso el funcionamiento de un equipo comercializado por RBI-instrumentation et Mesure. La sonda está constituida por dos cables de fibra óptica que finalizan en dos puntas separadas entre sí una distancia fija de 1.9 mm en la dirección del flujo. La punta cónica que constituye la parte sensible de la sonda de fibra óptica es de zafiro, presentando diámetros mínimos de 100 μm . El tiempo de respuesta del equipo es de 0.033 μs , mientras que la frecuencia de muestreo oscila entre 0.5 y 1 MHz.

El principio físico, inherente al funcionamiento de la sonda de fibra óptica se fundamenta en la variación del índice de refracción entre las dos fases involucradas. Para su detección, se transmite un rayo de luz infrarroja a través del cable de fibra óptica y se coloca en el interior del flujo que se desea observar el extremo donde se ubica la punta cónica de la sonda. En función del tipo de fluido que rodea la parte sensible de la sonda y de la geometría de la misma, la intensidad de luz reflejada (R) en la interfaz entre los dos medios con diferentes índices de refracción puede ser calculada mediante la ecuación de Fresnel:

$$R = K_{Fresnel} \left(\frac{\eta_{fluido} - \eta_{sonda}}{\eta_{fluido} + \eta_{sonda}} \right)^2 \quad (2)$$

siendo η el índice de refracción de cada medio ($\eta_{aire} = 1.00$, $\eta_{agua} = 1.33$, $\eta_{sonda} = 1.44$).

Cuando la punta de la sonda se halla rodeada por aire, el ángulo de incidencia del rayo de luz infrarroja es superior al ángulo crítico, produciéndose el fenómeno de la reflexión total (Figura 4). La luz reflejada recorre el cable de fibra óptica en dirección opuesta hasta alcanzar un fotodiodo sensible que permite la conversión de la señal óptica en una señal eléctrica. No obstante, esta señal puede ser débil o tener una forma no deseada, debido a los procesos de mojado y secado de la punta, y al ruido eléctrico. A través del módulo de amplificación optoelectrónico y aplicando una técnica de umbral de corte doble, se logra transformar la señal analógica en una señal TTL (Transistor-Transistor Logic), siendo el tiempo de respuesta del circuito optoelectrónico inferior al de una sonda de conductividad eléctrica.

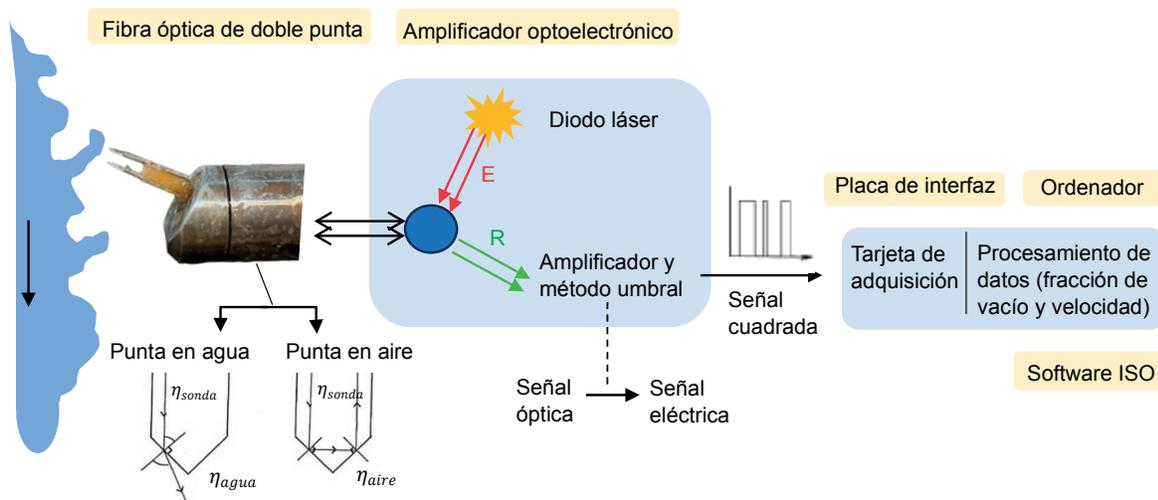


Figura 4 | Esquema de medición de una sonda de fibra óptica (adaptada de RBI Instrumentation et Mesure, 2013).

La determinación de la concentración de aire o fracción de vacío local promediada en el tiempo se basa en el análisis del tiempo en el que la punta de la sonda se encuentra en contacto con la fase dispersa (aire) con respecto al tiempo de muestreo total, empleando una frecuencia de muestreo entre 0.5 y 1 MHz. A pesar de que esta variable es proporcionada por ambas puntas en una sonda de dos puntas, se toma como referencia el valor de la primera punta, dado que ésta puede ocasionar perturbaciones que afecten la precisión de los datos obtenidos por la segunda punta.

La campaña experimental ha tenido por objeto la determinación de las características principales del flujo bifásico. Para ello, fijada una combinación de caudales aire-agua en el banco de calibración, se han considerado puntos de medida equiespaciados

cada 1 mm en la dirección perpendicular del chorro, y se han analizado secciones transversales situadas a diferentes distancias de la salida de la tobera. Para evitar cambios volumétricos rápidos en la concentración de aire, se ha considerado una distancia mínima igual al diámetro de salida de la tobera, lo que garantiza una presión cercana a la atmosférica. Entre las variables locales analizadas se han considerado: la distribución de la fracción de vacío, la velocidad media del flujo, el número de burbujas y el diámetro medio de las burbujas de Sauter (D_{sm}).

$$D_{sm} = \frac{3C \cdot V}{2F} \quad (3)$$

donde C es la fracción de vacío, V la velocidad media de las burbujas (suponiendo que las burbujas tienen la misma velocidad que el flujo), y F la frecuencia de detección de cambio de fase.

Estudios previos han demostrado la dependencia de las variables del flujo bifásico con la duración de la medición, considerándose el tiempo de muestreo un parámetro fundamental cuyo valor ha de ser cuidadosamente seleccionado para evitar alteraciones de los valores medidos. Chanson (2007) propuso tiempos de muestreo superiores a 30-40 s para que la tasa de conteo de burbujas y la fracción de vacío no se vean alteradas. Sin embargo, Felder y Chanson (2015) observaron que la influencia del tiempo de muestreo sobre la fracción de vacío y la frecuencia de burbujas es despreciable para períodos de muestreo superiores a 45 s. Del mismo modo, Krammer *et al.* (2020) sugieren un tiempo de muestreo de al menos 45 s para lograr mediciones precisas. Pese a que la frecuencia de muestreo de la sonda de fibra óptica es 1 orden superior (en torno a 500-1000 kHz) a las empleadas en las sondas de conductividad (en torno a 20-100 kHz), en este estudio se han seguido las recomendaciones de las sondas de conductividad y se ha empleado un tiempo de muestreo de 45 s. Con esta configuración, es posible minimizar el error de medición y lograr una mayor precisión en los resultados al alcanzarse la convergencia de las variables de estudio. Esto garantiza una variabilidad reducida de los datos obtenidos con la sonda de fibra óptica, situándolos dentro de un intervalo de variación de la fracción de vacío de $\pm 0.1\%$ (Figura 5).

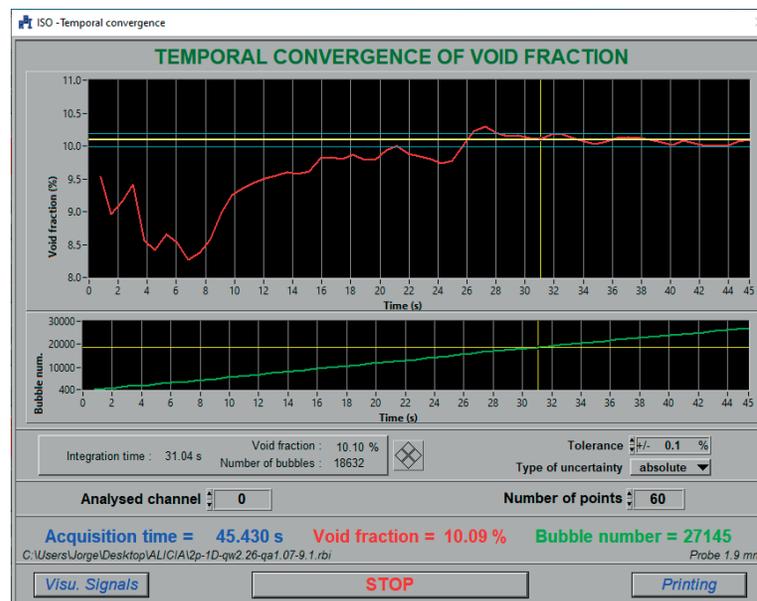


Figura 5 | Convergencia temporal de la fracción de vacío.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Para llevar a cabo este estudio, se ha considerado un caudal de agua $Q_{\text{agua}} = 2.26$ L/s y un caudal de aire $Q_{\text{aire}} = 1.07$ L/s, lo que resulta en una concentración de vacío del banco de calibración del $C = 32.13$ %. El presente apartado muestra la evolución de las diferentes variables analizadas, medidas con la sonda de fibra óptica de dos puntas, en diferentes puntos de la sección transversal del chorro circular. Las mediciones se han realizado en la sección situada a un diámetro (20.4 mm), cinco diámetros (102 mm), diez diámetros (204 mm) y veinte diámetros (408 mm) de la salida de la tobera. Las mediciones no han sido filtradas atendiendo a tamaños mínimos ni máximos de burbujas de aire, sino que se ha trabajado con los datos originales tal y como se registran en el equipo (práctica habitual en las publicaciones disponibles en la bibliografía).

La variación de las distintas variables se presenta en función de la distancia adimensional r_c/R_t , siendo r_c la distancia desde el centro del chorro al punto medido, con valor $r_c = 0$ en el eje del chorro circular, y R_t el radio interior de la tobera de salida. De este modo, $r_c/R_t = 1.0$ se corresponde con la lámina libre del chorro justo en la salida de la tobera.

La Figura 6 muestra la distribución de la fracción de vacío según el ancho del chorro, y en función de la distancia a la sección transversal considerada. Los datos obtenidos en el banco de calibración en la sección situada a un diámetro de la salida de la tobera muestran una fracción de vacío aproximadamente constantes en el centro del chorro ($r_c/R_t \leq 0.5$), lo que indica una adecuada mezcla de las dos fases en el banco de calibración. Comparando los resultados experimentales con los esperados, en la parte central de la primera sección transversal se aprecia un error del 20% en el rango de medida de la fracción de vacío. Al igual que se observa con los equipos de conductividad, estos resultados ponen de manifiesto la necesidad de calibrar los equipos para conocer su incertidumbre. A una distancia $r_c/R_t \approx 0.7-0.8$, la fracción de vacío se aproxima a cero, incrementándose posteriormente su valor en las proximidades de la superficie de la lámina libre del chorro. Asimismo, a medida que nos alejamos de la salida de la tobera, el proceso de intercambio de aire entre el chorro y la atmósfera se hace más prominente, lo que conduce a una reducción gradual del espesor del núcleo central del chorro hasta su completa mezcla, como se puede apreciar a una distancia de veinte diámetros. Al mismo tiempo, se produce la expansión lateral del chorro al pasar de condiciones presurizadas a presión atmosférica (véase la expansión de la línea con fracción de vacío del 99% en la Figura 6).

En la sección situada a un diámetro de la tobera, la disminución de la fracción de vacío conlleva la disminución de la frecuencia de cambio de fase cerca de la lámina libre ($r_c/R_t \approx 0.7$) (Figura 7). Posteriormente, se produce un incremento de ambas variables asociada a la interfaz aire-agua, hasta que finalmente la frecuencia de cambio de fase se sitúa próxima a cero al alcanzar la atmósfera ($r_c/R_t = 1$). Un comportamiento parecido se presenta en las secciones situadas a $5D_t$ y $10D_t$, con la diferencia de que el tramo descendente de la frecuencia de cambio de fase se acorta y el incremento del valor de la variable asociado a la interfaz se observa para relaciones cada vez menores de r_c/R_t a medida que nos alejamos de la tobera. En la última sección analizada (situada a $20D_t$ de la tobera), se observa que la frecuencia de cambio de fase alcanza su valor máximo en el centro del chorro y disminuye gradualmente hasta llegar a cero en la superficie libre. Esto indica que el cambio de fase es más rápido en el centro y se vuelve más lento a medida que nos acercamos a la superficie del chorro. Por otro lado, las condiciones en el centro del chorro tienden a mantenerse, con frecuencias de cambio de fase en torno a 600-650 Hz para $r_c/R_t < 0.4$.

En cuanto a la velocidad, su valor máximo se produce en el centro del chorro y tiende a disminuir a medida que nos alejamos del mismo, debido a la interacción entre el chorro y la atmósfera (Figura 8). Al analizar la parte central del chorro para distintas distancias respecto a la salida de la tobera, se observa que el valor de la velocidad media en la dirección principal del flujo se mantiene aproximadamente constante con un valor ≈ 10.1 m/s. Calculando la velocidad del chorro a partir del caudal y del área de la sección de salida se obtiene un valor de 10.19 m/s lo que coincide con el valor medido por la sonda de fibra óptica en el centro del chorro, siendo el error relativo inferior al 1%.

De acuerdo con la Figura 9, en la sección situada a un diámetro aguas abajo de la tobera, el tamaño de las burbujas de aire disminuye ligeramente a medida que nos aproximamos a la superficie libre del chorro, situándose aquellas de mayor tamaño en su interior. Estos resultados están en consonancia con los publicados por Ortega (2021) medidos con una sonda de conductividad. En las secciones más alejadas ($10D_t$ y $20D_t$), por el contrario, se presenta una tendencia creciente del tamaño de la burbuja conforme nos alejamos del centro y nos aproximamos a la superficie libre del chorro. El tamaño de las burbujas en el centro del chorro se mantiene aproximadamente constante ($\approx 2-3$ mm) para las secciones situadas a $1D_t$, $5D_t$ y $10D_t$, duplicándose su diámetro a $20D_t$ debido a la mayor aireación del centro del chorro por la interacción con la atmósfera.

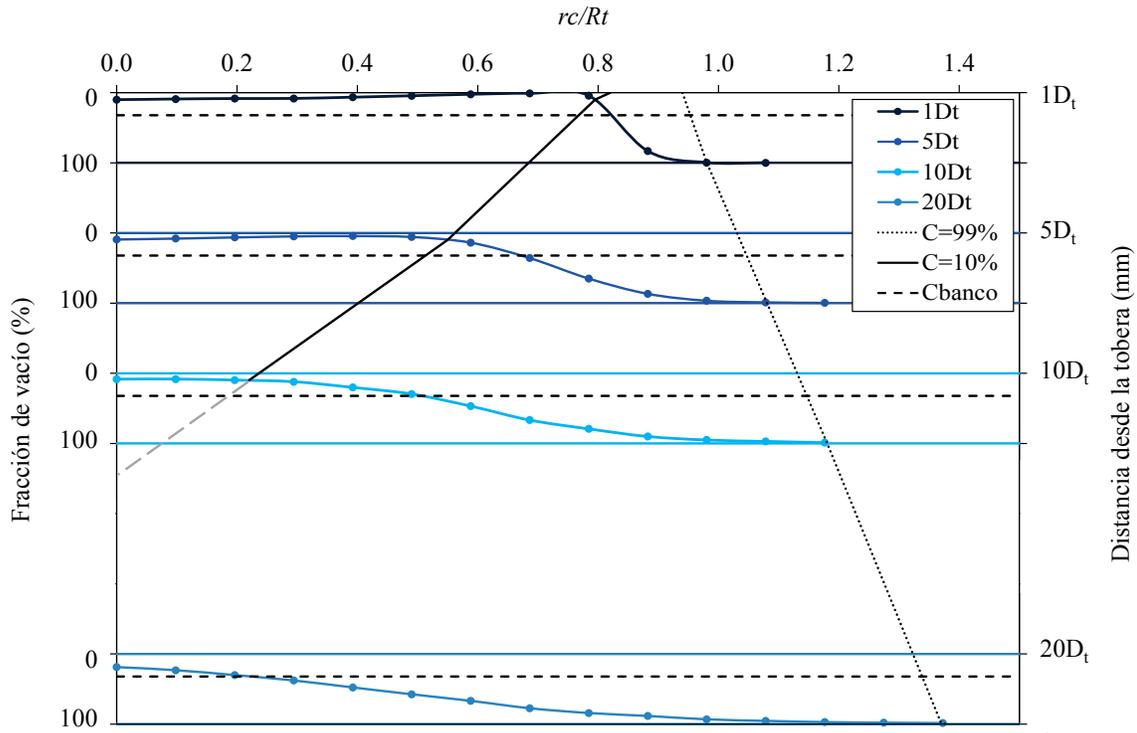


Figura 6 | Distribución de la fracción de vacío según la distancia al centro del chorro adimensionalizada con el radio de salida de la tobera ($R_t = 10.2$ mm) para $Q_{\text{agua}} = 2.26$ L/s, $Q_{\text{aire}} = 1.07$ L/s, $C = 32.13$ %.

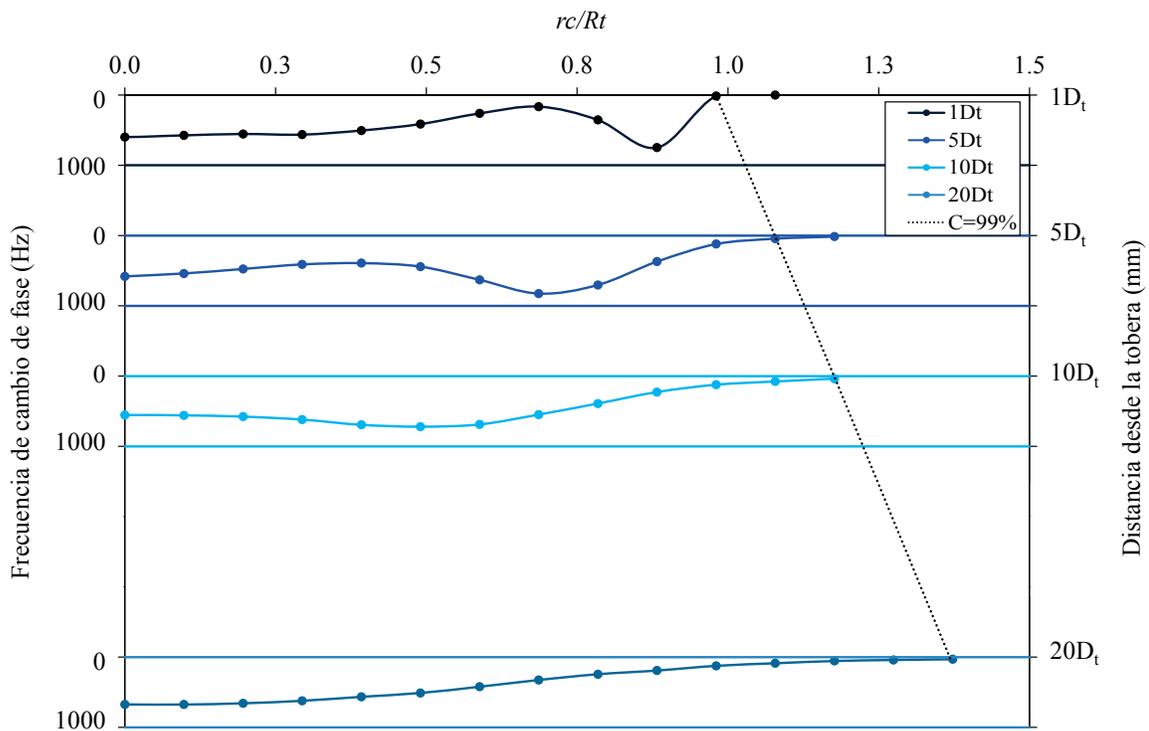


Figura 7 | Distribución de la frecuencia de cambio de fase según la distancia al centro del chorro adimensionalizada con el radio de salida de la tobera ($R_t = 10.2$ mm) para la mitad de la sección transversal. Caudales: $Q_w = 2.26$ L/s y $Q_a = 1.07$ L/s y secciones transversales a $1D_t$, $5D_t$, $10D_t$ y $20D_t$.

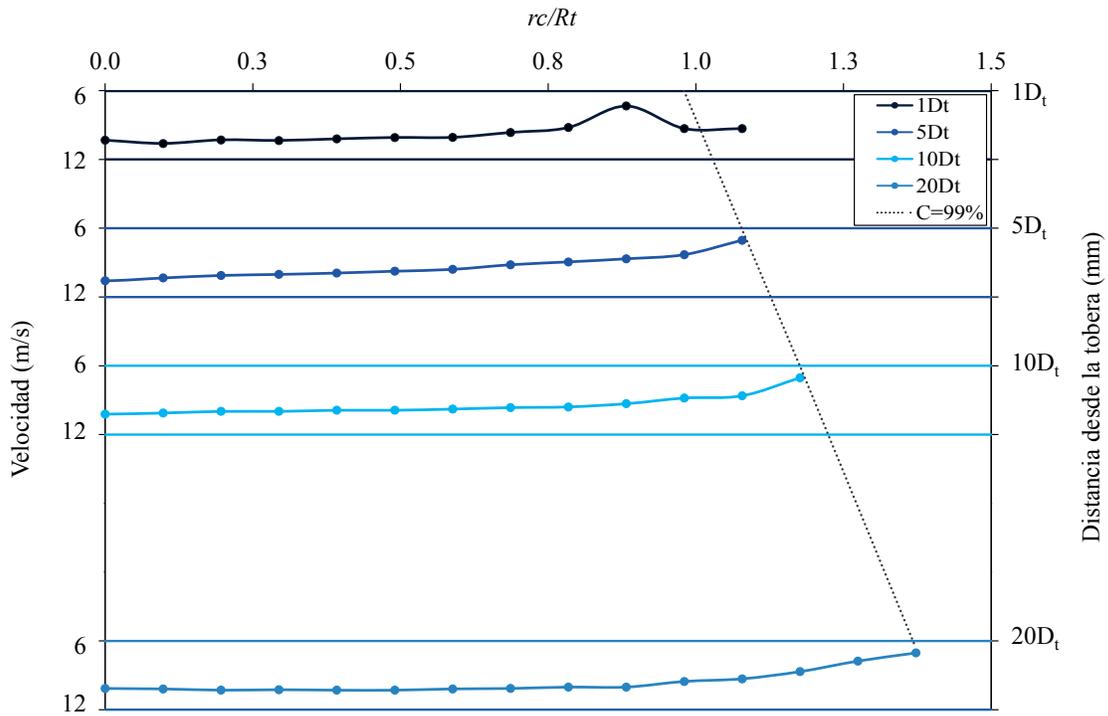


Figura 8 | Distribución de la velocidad según la distancia al centro del chorro adimensionalizada con el radio de salida de la tobera ($R_t = 10.2$ mm) para la mitad de la sección transversal. Caudales: $Q_w = 2.26$ L/s y $Q_a = 1.07$ L/s y secciones transversales a $1D_t$, $5D_t$, $10D_t$ y $20D_t$.

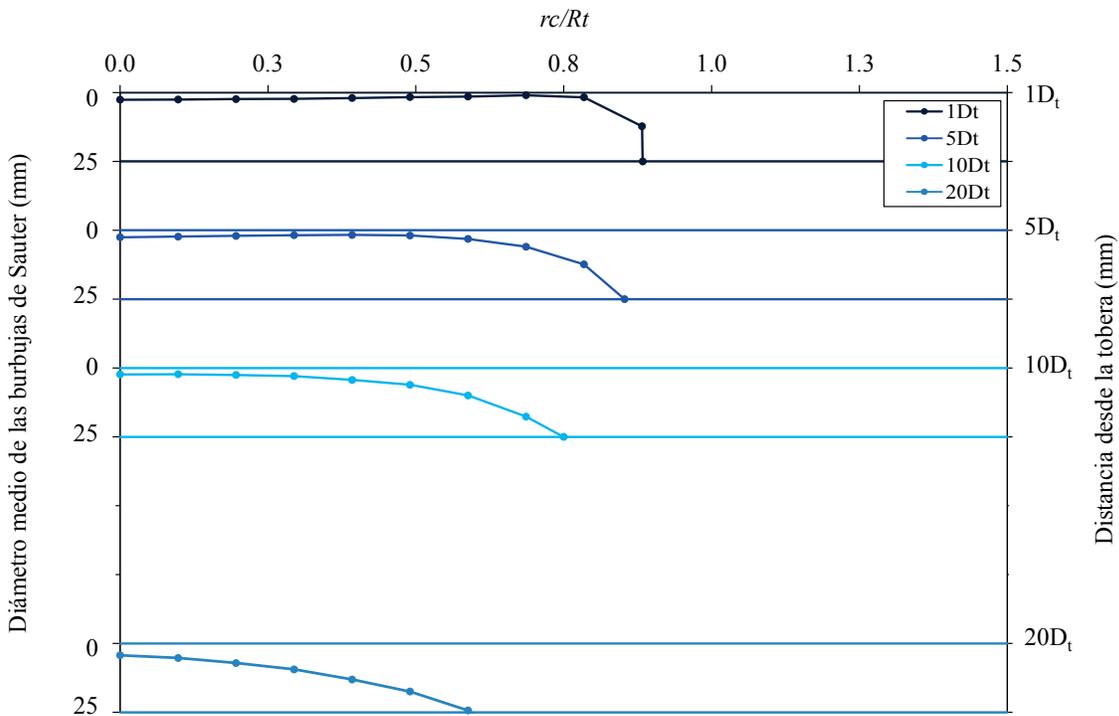


Figura 9 | Distribución del diámetro medio de las burbujas de Sauter según la distancia al centro del chorro adimensionalizada con el radio de salida de la tobera ($R_t = 10.2$ mm) para la mitad de la sección transversal. Caudales: $Q_w = 2.26$ L/s y $Q_a = 1.07$ L/s y secciones transversales a $1D_t$, $5D_t$, $10D_t$ y $20D_t$.

CONCLUSIONES

La experimentación en bancos de calibración especialmente diseñados para evaluar el desempeño de los equipos de medición de flujos bifásicos agua-aire es de vital importancia a fin de reducir la incertidumbre asociada a las mediciones efectuadas. Multitud de estudios se han llevado a cabo en esta área, calibrando el equipo en función de los saltos de señal que se producen al introducir y sacar la sonda del agua, por lo que la incertidumbre en la calibración y en las campañas de medición puede ser muy importante. Lograr determinar con exactitud la fracción de vacío y la velocidad de un chorro turbulento descargado a la atmósfera permitirá un mayor entendimiento del proceso de desintegración del chorro. Esto se traduce en la consecución de diseños más realistas de diversas infraestructuras hidráulicas que operan bajo un régimen de flujo bifásico, siendo ejemplo de ello la mejora del diseño de los aliviaderos o de los cuencos de disipación de energía, teniendo en cuenta la disipación de energía experimentada por el chorro durante la caída.

A pesar de la trascendencia de estos estudios y de las múltiples técnicas de medición disponibles, estas medidas continúan siendo un desafío. En el presente trabajo, se han encontrado errores en la medición de la fracción de vacío cercanos al 20%, valor que está en el orden del reportado por otros autores. Sin embargo, el error asociado a la medición de la velocidad se reduce al 1%. Asimismo, conocer la evolución del tamaño y forma de la burbuja es esencial, dada la intrusividad de la instrumentación utilizada, aspecto que ha de ser tenido en cuenta durante el análisis de los resultados.

AGRADECIMIENTOS

La primera autora expresa su agradecimiento por la ayuda económica recibida de la “Fundación Séneca, Agencia de Ciencia y Tecnología de la Región de Murcia” para la formación de personal investigador, beca número 21592/FPI/21.

REFERENCIAS

- Bachalo, W.D. 1994. Experimental methods in multiphase flows. *International Journal of Multiphase Flow*, 20, 261-295. [https://doi.org/10.1016/0301-9322\(94\)90075-2](https://doi.org/10.1016/0301-9322(94)90075-2)
- Bachmeier, G. 1988. *Setup, calibration and use of a measuring probe for determination of air concentration in a spillway chute*. Diploma dissertation, Institute for Hydromechanics of Karlsruhe University, Karlsruhe, Germany (translated from the German original by Duncan Anderson, USBR).
- Boes, R.M., Hager, W.H. 1998. Fiber-optical experimentation in two-phase cascade flow. *Proc. Int. RCC Dams Seminar*, Ed. K. Hansen, Denver, EUA.
- Borges, J.E., Pereira N., Matos J., Frizell K.W. 2010. Performance of a combined three hole conductivity probe for void fraction and velocity measurement in air–water flows. *Experiments in Fluids*, 48, 17-31. <https://doi.org/10.1007/s00348-009-0699-1>
- Boyer, C., Duquenne, A.M., Wild, G. 2002. Measuring techniques in gas–liquid and gas–liquid–solid reactors, *Chemical Engineering Science*, 57, 3185-3215. [https://doi.org/10.1016/S0009-2509\(02\)00193-8](https://doi.org/10.1016/S0009-2509(02)00193-8)
- Cain, P. 1978. Measurements within self-aerated flow on a large spillway, Res. Rep. No. 78-18, Univ. of Canterbury, Christchurch, New Zealand.
- Cartellier, A., Achard, J.L. 1991. Local phase detection probes in fluid/fluid two-phase flows, *Review of Scientific Instruments*, 62, 279-303. <https://doi.org/10.1063/1.1142117>
- Chanson, H. 2002. Air-Water Flow Measurement with Intrusive, Phase-Detection Probes: Can We Improve Their Interpretation?, *Journal of Hydraulic Engineering*, 128(3), 1-4. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(2002\)128:3\(252\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(2002)128:3(252))

- Chanson, H. 2007. Dynamic similarity and scale effects affecting air bubble entrainment in hydraulic jumps. In: 6th Intl. Conf. *Multiphase Flow*, ICMF, Leipzig, Germany, 9–13, July 2007.
- Chanson, H., 2016. Phase-detection measurements in free-surface turbulent shear flows. *Journal of Geophysics and Engineering*, 13, 74-87. <https://doi.org/10.1088/1742-2132/13/2/S74>
- Felder, S., Chanson, H. 2015. Phase-detection probe measurements in high-velocity free-surface flows including a discussion of key sampling parameters. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 61, 66-78. <https://doi.org/10.1016/j.expthermflusci.2014.10.009>
- Frizell, K.H., Ehler, D.G., Mefford, B.W. 1994. Developing air concentration and velocity probes for measuring in highly-aerated, high-velocity flow. *Proc. Hyd. Engrg. Conf.*, ASCE, Buffalo, N.Y., pp. 268-277.
- Hohermuth, B., Kramer, M., Felder, S., Valero, D. 2021. Velocity bias in intrusive gas-liquid flow measurements. *Nature Communications*, 12, 4123. <https://doi.org/10.1038/s41467-021-24231-4>
- Kramer, M., Hohermuth, B., Valero, D., Felder, S. 2020. Best practices for velocity estimations in highly aerated flows with dual-tip phase-detection probes. *International Journal of Multiphase Flow*, 126, 103228. <https://doi.org/10.1016/j.ijmultiphaseflow.2020.103228>
- Kramer, M., Valero, D., Chanson, H., Bung, D.B. 2019. Towards reliable turbulence estimations with phase-detection probes: an adaptive window cross-correlation technique. *Experiments in Fluids*, 60, 1-6. <https://doi.org/10.1007/s00348-018-2650-9>
- Matos, J., Frizell, K.H. 1997. Air concentration measurements in highly turbulent aerated flow. *Proc. 28th IAHR Congress*. Theme D, Vol. 1, Ed. Sam S.Y. Wang and Torkild Carstens, San Francisco, USA, pp. 149-154.
- Matos, J., Frizell, K.H., André, S., & Frizell, K.W. 2002. On the performance of velocity measurement techniques in air-water flows. In: *Proceedings of hydraulic measurements and experimental methods 2002 conference*, EWRI-ASCE/IAHR, Estes Park, Colorado, USA (CD-ROM). [https://doi.org/10.1061/40655\(2002\)58](https://doi.org/10.1061/40655(2002)58)
- Nagash, B.W. (1994). Void fraction measurement techniques for gas-liquid bubbly flows in closed conduits: A literature review. *Proc. Hyd. Engrg. Conf.*, ASCE, Buffalo, N.Y., pp. 278-288.
- Ortega, P.R. 2021. *Análisis de la lámina vertiente en el sobrevertido de presas de fábrica*. Doctoral Thesis. Universidad Politécnica de Cartagena (in Spanish).
- RBI Instrumentation et Mesure: *User's Guide, Two-Phase Flow equipment with ATL unit*. Chemin du Vieux Chene -F-38240 Meylan, France, 2013.
- Valero, D., Bung, D.B. 2018. Artificial neural networks and pattern recognition for air-water flow velocity estimation using a single-tip optical fibre probe. *Journal of Hydro-environment Research*, 19, 150-159. <https://doi.org/10.1016/j.jher.2017.08.004>

