

Construcción e implementación de sondas de conductividad para la medición de flujos bifásicos agua-aire

Construction and implementation of conductivity probes for the measurement of two-phase water-air flows

(Recepción **DD/MM/AAAA**; Aceptación **DD/MM/AAAA**)

Ortega P.R.^{1,2}; Marco F.¹; Castillo L.G.¹

¹Escuela de Ingeniería de Caminos Canales y Puertos y de Ingeniería de Minas
Universidad Politécnica de Cartagena (UPCT)
Paseo Alfonso XIII, 52, 30203 Cartagena, España

²Escuela Politécnica Nacional
Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental Quito, Ecuador
Teléfono: 868071014
Email: patricio.ortega@epn.edu.ec

Resumen. Los flujos bifásicos agua-aire es uno de los fenómenos más estudiados en la naturaleza. Estos flujos poseen características diferentes, por lo que necesitan una adecuada instrumentación para su correcta medición, ya que la instrumentación tradicional no es suficiente para este propósito. Para el presente trabajo se han desarrollado dos sondas de conductividad, de una y dos puntas respectivamente, que nos permiten medir en un resalto hidráulico la concentración, la frecuencia de interferencia, el número de burbujas, la velocidad media agua-aire y el tamaño de burbuja. Aunque esta instrumentación es de tipo intrusivo, permite registrar el cambio de fase agua-aire por efecto de la resistividad/conductividad de ambas fases.

Palabras clave. Concentración de aire; frecuencia de interferencia; resalto hidráulico; sonda de conductividad.

Abstract. Two-phase water-air flows are one of the most studied phenomena in nature. These flows have different characteristics, so they need an adequate instrumentation for their correct measurement and the traditional instrumentation is not sufficient for this purpose. For the present work, two conductivity probes have been developed, with one and two tips respectively, which allow us to measure the concentration, the interference frequency, the number of bubbles, the average water-air velocity and the size of bubble in a hydraulic jump. Although this instrumentation is of the intrusive type it allows to register the water-air phase change due to the resistivity/conductivity of both phases.

Keywords. Air concentration; conductivity probe; hydraulic jumps; interference frequency.

1. Introducción

Tanto en la naturaleza como en las estructuras hidráulicas es muy común encontrar flujos bifásicos agua-aire altamente turbulentos, como por ejemplo en cascadas, oleajes, ríos, disipadores de energía o rápidas lisas o escalonadas. La introducción de aire en la masa de agua provoca que esta cambie sus propiedades, determinándose así, dos tipos de procesos de introducción de aire. Uno conocido como aeración local y otro denominado aireación continua (Chanson, 2004).

Para medir las características hidrodinámicas del agua se han utilizado equipos de medición clásicos (e.g. Tubo Pitot, limnímetros) los cuales se ven afectados por el ingreso de aire que incrementa erróneamente la concentración. Para flujos altamente aireados donde la concentración de aire es mayor a 5%, es necesario el uso de instrumentación especial

de carácter intrusivo (e.g. fibra óptica, sonda de conductividad) (Chanson et al., 2007).

Esta instrumentación permite detectar y registrar los cambios de fase agua-aire. Mediante un procesamiento de señales se pueden obtener parámetros tales como la concentración de aire, la frecuencia de interferencia, la distribución de frecuencia de burbuja y la velocidad media de flujo.

2. Metodología

Las propiedades del flujo agua-aire fueron medidas utilizando sondas de conductividad para la detección del cambio de fases. El principio de este tipo de sondas se basa en la diferente resistividad que posee el agua y el aire (Toombes, 2002), puesto que la resistividad del aire es mil veces más grande que la resistividad del agua.

Las sondas de conductividad fueron desarrolladas y construidas en la Universidad Politécnica de

Cartagena (UPCT), España. Un detalle de las sondas se indica a continuación en la Tabla 1 y Figura 1.

Tabla 1. Detalle de las sondas de conductividad.

Tipo de Sonda	Diámetro Punta [mm]	Δx [mm]	Δy [mm]	Frecuencia muestreo [kHz]	Tiempo muestreo [s]
Una punta	0.25	-	-	5 10	180 90
Dos puntas	0.25	1.241	1.091	10	90

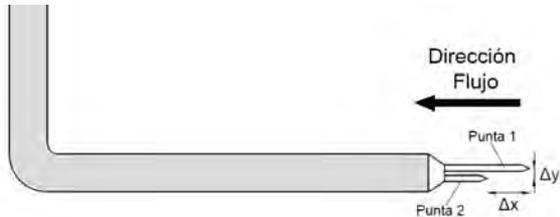


Figura 1. Detalle de la sonda de conductividad de dos puntas.

Las sondas de conductividad de una punta nos dan información de concentración de aire (C), número de burbujas y frecuencia de interferencia (F_a), pero no da valores de velocidad (v), ni de longitud de burbuja. Una segunda sonda de dos puntas fue desarrollada en la UPCT. Esta permite comparar dos señales al mismo tiempo, y mediante la técnica de correlación cruzada es posible obtener el tiempo de desfase entre las dos señales. El coeficiente de correlación varía en función del tiempo de desfase y se expresa mediante un correlograma.

El tiempo de desfase (Δt) de las señales corresponde al valor máximo del coeficiente de correlación, y es el tiempo promedio que tarda la burbuja en viajar desde la punta 1 a la punta 2 (Figura. 2). Si la distancia entre las puntas es conocida se puede conocer la velocidad media del flujo agua-aire aplicando la conocida relación (Toombes, 2002):

$$v = \frac{\Delta x}{\Delta t} \quad (1)$$

Un sistema de adquisición de datos nos permite registrar las señales analógicas de las sondas. Estas señales son transformadas a una señal cuadrada binaria, y mediante un procesamiento de las mismas, se pueden obtener las características antes mencionadas. En la Figura 3 se observa el registro de una señal analógica para la sonda de una punta y sus diferentes voltajes. Es necesario definir un umbral para el procesamiento y cambio de la señal binaria.

Para la selección del umbral se ha utilizado el criterio de umbral simple (Felder, 2013). Esta técnica estima un voltaje característico entre los voltajes de agua y aire de tal manera que la señal cuadrada procesada contiene rangos aceptables de duración y tamaño de burbuja.

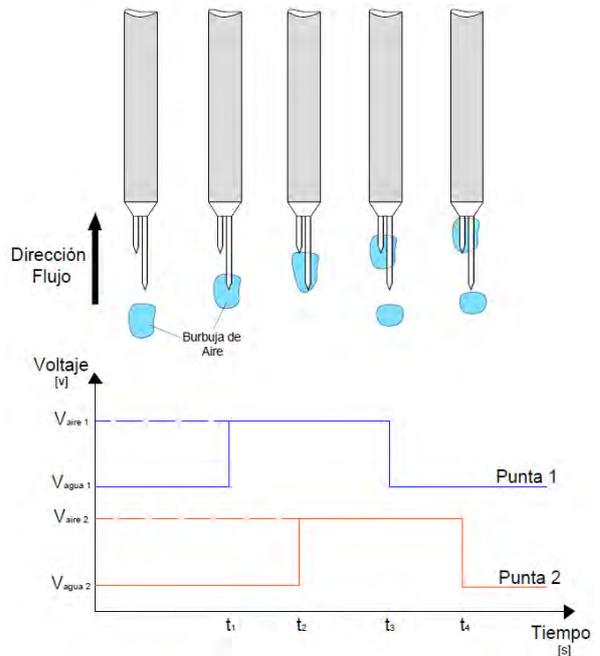


Figura 2. Esquema de la detección de burbujas, sonda de resistividad de dos puntas y generación de señal cuadrada binaria.

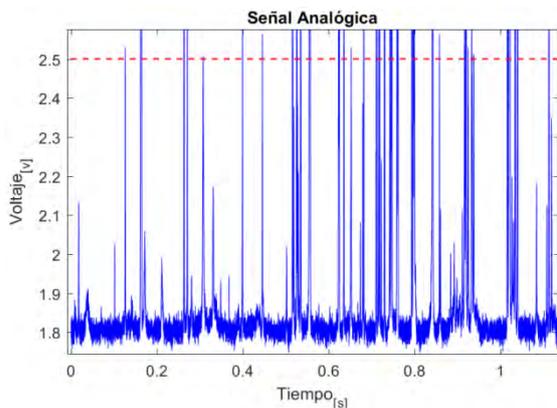


Figura 3. Señal analógica, sonda de resistividad de una punta. Frecuencia de muestreo de 5KHz, con un umbral de 2.5 voltios.

La señal medida en la sonda de conductividad puede ser usada para medir la longitud de la cuerda de las burbujas de aire presentes en el flujo, y se expresa mediante una distribución de probabilidad (C_{ha}), y definiéndose a partir del tiempo de contacto de la sonda con el aire (Δt_a), durante la medición.

$$C_{ha} = v \cdot \Delta t_a \quad (2)$$

Las condiciones experimentales del presente trabajo son el muestreo, con dos sondas de conductividad, de una y dos puntas respectivamente, en un resalto hidráulico. En la Tabla 2 se muestran las características del resalto hidráulico ensayado.

Tabla 2. Características del resalto hidráulico.

Q [l/s]	x_a [m]	y_a [m]	b [m]	a [m]	Fr
10.8	0.35	0.015 0.030	0.30	0.05	7.6

Donde (Q) es el caudal ensayado, (x_a) la distancia a la compuerta, (y_a) la altura medida desde el fondo del canal, (b) el ancho del canal, (a) la apertura de la compuerta y (Fr) el número de Froude.

En la Tabla 3 se muestra una comparativa de resultados de concentración, frecuencia de interferencia y número de burbujas para frecuencias de medición de 5 kHz y 10 kHz. Como se puede observar en la tabla, para un mismo umbral, se obtienen valores de concentración muy similares en ambos casos. Sin embargo, los valores de frecuencia y número de burbujas son muy diferentes, ya que en la medición realizada a 10 kHz los valores son muy superiores. Esto es debido a la capacidad de detección que tiene una sonda asociado a una frecuencia, ya que al medir a una mayor frecuencia la sonda es capaz de detectar burbujas de menores tamaños.

Tabla 3. Valores de concentración, frecuencia de interferencia y número de burbujas en el resalto hidráulico ($Q=10.8$ l/s, $F_r=7.5$, $y_f=0.013$ m, $L_r=0.87$ m, $x_a=0.35$ m, $y_a=0.03$ m).

Frecuencia de medición [kHz]	Umbral	C [-]	F [Hz]	Nº de burbujas
5	2.5	0.09075	31.361	5645
10	2.5	0.084401	134.96	12147

En la Figura 4 se muestra la concentración y la frecuencia de interferencia para distintos valores del umbral agua-aire, y se puede observar como las concentraciones tienden a un cierto valor conforme se aumenta el umbral.

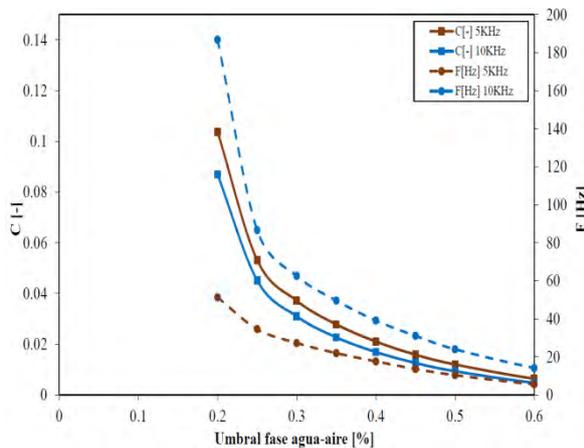


Figura 4. Representación de la concentración y la frecuencia de interferencia en un resalto hidráulico ($Q=10.8$ l/s, $F_r=7.5$, $y_f=0.013$ m, $L_r=0.87$ m, $x_a=0.35$ m, $y_a=0.03$ m).

En la práctica no solo se registran burbujas de aire de un mismo tamaño, sino un rango de tamaño de burbujas. De esta forma lo más recomendable es presentarlo como una distribución de longitudes de burbuja en forma de probabilidad de ocurrencia. En la Figura 5 se indica la distribución de tamaños de burbuja a una probabilidad asociada, y su respectiva función para una velocidad de 2.21 m/s medida en el punto x_a, y_a .

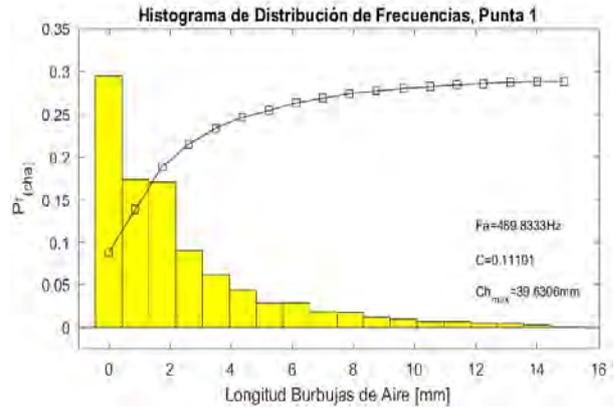


Figura 5. Distribución de longitudes de burbuja, ($Q=10.8$ l/s, $v=2.21$ m/s, $F_r=7.5$, $y_f=0.013$ m, $L_r=0.87$ m, $x_a=0.35$ m, $y_a=0.03$ m).

3. Conclusiones

La sonda de conductividad puede ser un buen método para la caracterización de burbujas. La variación de la frecuencia de medición de la sonda afecta a la frecuencia de interferencia y al número de burbujas detectadas, aumentando su valor para una mayor frecuencia de medición, ya que es capaz de detectar menores tamaños de burbuja. Sin embargo, la concentración arroja valores muy similares para distintas frecuencias de medición. Gracias a esta instrumentación es posible caracterizar de mejor manera los flujos bifásicos agua-aire.

Agradecimientos

Los autores agradecen al Ministerio de Educación, Cultura y Deporte por la ayuda financiera recibida de la beca de Formación de Profesorado Universitario (FPU), número de referencia FPU16/05658.

Referencias

Chanson, H. (2004). "Air-water flows in water engineering and hydraulic structures. Basic processes and metrology" *Hydraulics of Dams and River Structures* 2004; 3-16.

Chanson, H. Carosi G. (2007). "Advanced post-processing and correlation analyses in high-velocity air-water flows" *Environmental Fluid Mechanics* 2007; 495-508.

Felder, S. (2013). "Air-Water Flow Properties on Stepped Spillways for Embankment Dams: Aeration, Energy Dissipation and Turbulence on Uniform, Non-Uniform and Pooled Stepped Chutes" *PhD Thesis*. School of Civil Engineering, The University of Queensland, Australia.

Murzyn, F. Chanson, H. (2009). "Experimental investigation of bubbly flow and turbulence in hydraulic jumps" *Environmental Fluid Mechanics*, 2009; 143-159.

Toombes, L. (2002). "Experimental study of air-water flow properties on low-gradient stepped cascades" *PhD Thesis*. School of Civil Engineering, The University of Queensland, Australia.