

# 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 01/03/2019; Aceptación 21/06/2019)

Ortega P.R.<sup>1,2</sup>; Marco F.<sup>1</sup>; Castillo L.G.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Escuela de Ingeniería de Caminos Canales y Puertos y de Ingeniería de Minas  
Universidad Politécnica de Cartagena (UPCT)  
Paseo Alfonso XIII, 52, 30203 Cartagena, España  
Teléfono: 868071014

<sup>2</sup>Escuela Politécnica Nacional  
Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental Quito, Ecuador  
Email: patricio.ortega@epn.edu.ec

**Resumen.** Los flujos bifásicos agua-aire representan uno de los fenómenos más estudiados en la naturaleza. Estos flujos poseen características particulares a las de los flujos monofásicos, por lo que necesita una instrumentación particular para su correcta medición, ya que la instrumentación tradicional no es suficiente para este propósito. Para el presente trabajo se han elaborado dos sondas de conductividad, de una y dos puntas respectivamente, que permiten medir en un resalto hidráulico la concentración también conocida como fracción de vacío, la frecuencia de interferencia, el número de burbujas, la velocidad media agua-aire y la longitud de cuerda de las burbujas. 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 specific characteristics; as a result, adequate instrumentation should be used to measure them correctly. In this work, two conductivity probes have been elaborated, with one and two tips respectively, which allow us to measure the concentration also known as void fraction, the interference frequency, the number of bubbles, the average water-air velocity and bubble chord length in a hydraulic jump. Although this instrumentation is of the intrusive type it allows registering 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, limnómetros) 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 en un flujo altamente aireado. 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 poseen 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 elaboradas 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]	$\Delta x$ [mm]	$\Delta y$ [mm]	Frecuencia muestreo [kHz]	Tiempo muestreo [s]
Una punta	0.25	-	-	5 10	180 90
Dos puntas	0.25	1.24	1.09	10	90

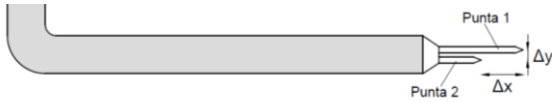


Figura 1. Detalle de la sonda de conductividad de dos puntas.

Las sondas de conductividad de una punta generan información de concentración de aire ( $C$ ), número de burbujas y frecuencia de interferencia ( $F_o$ ), pero no de 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 ( $\Delta t$ ) 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. Si la distancia entre las puntas es conocida se puede conocer la velocidad media del flujo bifásico.

En la Figura 2 se indica la forma como la sonda de conductividad registra las burbujas de aire, el desfase entre las dos señales y los diferentes voltajes para el agua y el aire. Un sistema de adquisición de datos permite registrar las señales analógicas de las sondas. Estas señales son transformadas a una señal cuadrada binaria mediante un script escrito en MATLAB, y mediante un procesamiento de señales, 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. Se definió un umbral de 2.5 voltios para el procesamiento y cambio de la señal analógica a 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.

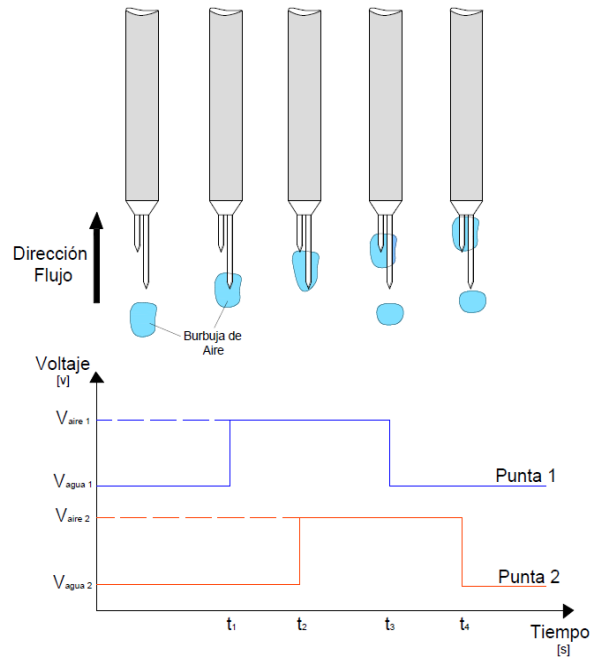


Figura 2. Esquema de la detección de burbujas, sonda de resistividad de dos puntas y generación de señal cuadrada binaria.

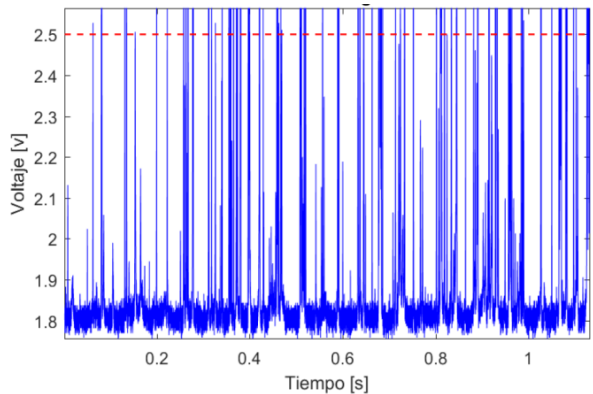


Figura 3. Señal analógica, sonda de resistividad de una punta. Frecuencia de muestreo de 5KHz, con un umbral de 2.5 voltios.

La señal medida en la sonda de conductividad puede ser usada para medir la longitud de cuerda de las burbujas ( $C_{ha}$ ), como producto de la velocidad media de flujo y el tiempo de contacto de la sonda con el aire, expresada mediante de la siguiente expresión:

$$C_{ha} = v \cdot \Delta t_a \quad (1)$$

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, ( $Fr$ ) el número de Froude y ( $L_r$ ) la longitud, el resalto hidráulico medido en laboratorio se muestra en la Figura 4.

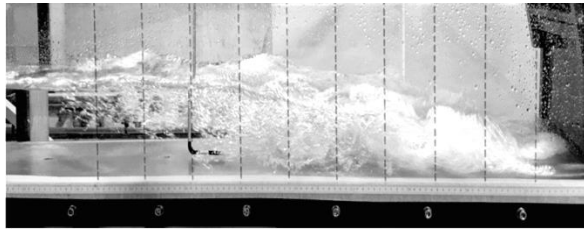


Figura 4. Foto del resalto hidráulico en un laboratorio ( $Q=10.8$  l/s,  $Fr=7.5$ ,  $L_r=0.87$  m,  $b=0.30$  m).

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. 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 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,  $Fr=7.5$ ,  $y_f=0.013$  m,  $L_r=0.87$  m,  $x_a=0.35$  m,  $y_a=0.03$  m).

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

En la Figura 5 se muestra la distribución vertical de la concentración de aire en un resalto hidráulico, donde ( $d_1$ ) es el calado de agua a la salida de la compuerta.

Los valores registrados fueron medidos con la sonda de conductividad y con un equipo de fibra óptica de la casa RBI-Instrumentation, la distribución en la concentración medida con ambas instrumentaciones muestra una tendencia similar con la presentada en la bibliografía (Hang 2014).

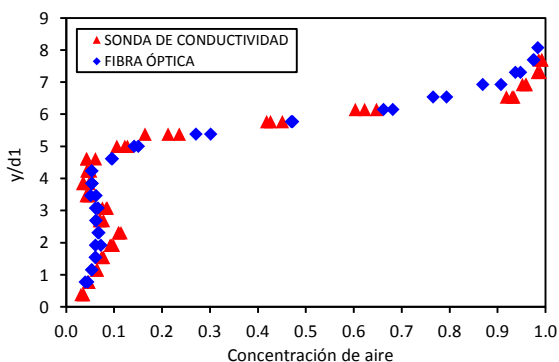


Figura 5. Distribución vertical de la concentración de aire en un resalto hidráulico ( $Q=10.8$  l/s,  $Fr=7.5$ ,  $L_r=0.87$  m,  $b=0.30$  m).

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 cuerda de las burbujas en forma de probabilidad de ocurrencia. En la Figura 6 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  $x_a$ ,  $y_a$  para la punta 1 y punta 2.

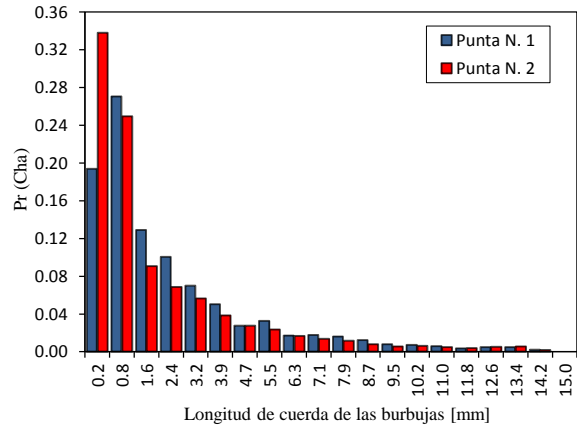


Figura 6. Distribución de longitudes de cuerda de las burbujas a una probabilidad asociada, y su respectiva función para una velocidad de 2.21 m/s medida en el punto  $x_a$ ,  $y_a$  para la punta 1 y punta 2 ( $Q=10.8$  l/s,  $v=2.21$  m/s,  $Fr=7.5$ ,  $y_f=0.013$  m,  $L_r=0.87$  m,  $x_a=0.35$  m,  $y_a=0.03$  m).

### 3. Conclusiones

Los valores experimentales de concentración medidos con la sonda de conductividad/resistividad son semejantes a los valores medidos con el equipo de fibra óptica. El proceso de calibración de la sonda de conductividad es muy importante para definir el umbral de corte para el tratamiento y procesamiento de las señales y obtención de resultados.

La longitud de cuerda con mayor probabilidad de ocurrencia es del orden de 1.0mm para resalto no desarrollados con números de Froude de 7.6. La variación de la frecuencia de medición de la sonda afecta el número de burbujas detectadas, según los resultados de este trabajo se recomienda el registro de burbujas con frecuencias iguales o mayores a 10kHz.

### Agradecimientos

El primer autor agradece la ayuda económica facilitada por la Escuela Politécnica Nacional del Ecuador en base al programa de movilidad de profesorado para realizar estudios de doctorado. De igual manera, el segundo autor agradece 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.

Hang, W. (2014) "Turbulence and Air Entrainment in Hydraulic Jumps" *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.