

## ANÁLISIS DEL FLUJO BIMODAL EN LAS FLUCTUACIONES DE FRACCIÓN VOLUMÉTRICA GASEOSA EN UN FLUJO A DOS FASES

Graciela B. Roston<sup>a</sup>, María E. Ascheri<sup>b</sup>, María C. Martín<sup>b</sup> y Rubén Pizarro<sup>b</sup>

<sup>a</sup> Departamento de Física, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Universidad Nacional de La Pampa, Uruguay 151(6300), Santa Rosa (LP), Argentina, [gracielar@exactas.unlpam.edu.ar](mailto:gracielar@exactas.unlpam.edu.ar)

<sup>b</sup> Departamento de Matemática, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Universidad Nacional de La Pampa, Uruguay 151(6300), Santa Rosa (LP), Argentina, [mavacheri@exactas.unlpam.edu.ar](mailto:mavacheri@exactas.unlpam.edu.ar)

**Palabras Clave:** flujo a dos fases, modelo bimodal, reactor nuclear.

**Abstract.** Los procesos físicos que gobiernan las fluctuaciones de la fracción volumétrica gaseosa en un flujo a dos fases no están muy bien explicados y constituyen un problema abierto. Las opiniones de los investigadores en este punto son muy diversas y las discrepancias son grandes.

En un trabajo previo, planteamos este problema y analizamos distintos modelos matemáticos mediante datos obtenidos de una central nuclear de potencia. Comparando estos modelos, obtuvimos que el más adecuado para la estimación de la fracción volumétrica gaseosa es el modelo de Bernoulli modificado o bimodal.

En este trabajo, analizamos la validez del mismo para más de un canal de instrumentación en un reactor nuclear de potencia y para diferentes frecuencias del conjunto de datos. Además, a partir del ajuste bimodal y teniendo en cuenta la estadística de Bernoulli, encontramos un indicador objetivo del flujo a dos fases  $z$  que depende de la posición en el canal de instrumentación y de la estructura del fluido.

## 1 INTRODUCCIÓN

En el flujo simultáneo de gas y líquido en un canal pueden existir diferentes configuraciones de flujo (esquemas de flujo) de acuerdo a sus propiedades, a la geometría del canal y a cómo varían las velocidades de la fase líquida y la gaseosa. El conocimiento acerca de la estructura y dinámica del flujo a dos fases es importante para un gran número de procesos, incluyendo el comportamiento del refrigerante en reactores nucleares de potencia.

Estudios previos que describen las fluctuaciones de la fracción volumétrica gaseosa en un flujo a dos fases explican parcialmente los efectos medidos, o tienen una aplicabilidad cuestionable ya que han sido realizados en flujos de gas-líquido o en dispositivos experimentales diseñados especialmente (diferentes a las condiciones de operación en una planta) (Atta et al, 1977; Analytis, 1996; Lübbesmeyer, 1983; Chaudhary et al, 1995; Naito et al, 1980; Kosály, 1983). Un problema práctico radica en la relación que existe entre la velocidad medida y las velocidades del flujo a dos fases, la velocidad del gas, del líquido o ambas. Debido a esto, la interpretación de las medidas obtenidas es aun dificultosa.

Un estudio completo de la literatura acerca del monitoreo del flujo a dos fases mediante el Análisis de Ruido Neutrónico se encuentra en Stekelenburg y Van der Hagen (1993). Estos autores encontraron que la teoría que involucra los procesos neutrónicos está bastante bien entendida, ya que los investigadores son capaces de predecir la respuesta de un detector neutrónico ante una fluctuación de densidad arbitrariamente distribuida; pero los procesos físicos que gobiernan las fluctuaciones de la fracción volumétrica gaseosa en un flujo a dos fases no están muy bien explicados y constituyen un problema abierto. Esta es la razón por la que las investigaciones acerca de las fluctuaciones del flujo a dos fases continúan todavía (Mori et al, 1995; Ireland y Stephens, 2002; Kaji et al, 1999; Windecker y Anglart, 2001, entre otros).

En un trabajo previo (Roston et al, 2006), utilizando datos obtenidos de una central nuclear de potencia en operación, aplicamos distintos modelos matemáticos para estudiar los cambios de intensidad de las fluctuaciones de la fracción volumétrica gaseosa a lo largo del tubo de instrumentación en un reactor nuclear. Mediante la comparación de estos modelos, obtuvimos un modelo adecuado para la estimación de la fracción volumétrica gaseosa basado en el modelo binomial modificado presentado por Kozma (1992 y 1995).

En este trabajo, analizamos la validez del mismo para más de un canal de instrumentación en un reactor nuclear de potencia y para diferentes frecuencias del conjunto de datos. Además, a partir del ajuste bimodal encontramos un indicador objetivo del flujo a dos fases  $z$  que depende de la posición en el canal de instrumentación y de la estructura del fluido.

## 2 TEORÍA

La intensidad del ruido neutrónico normalizado del detector (NRMS) aumenta de acuerdo a la altura del canal de medición y es función de la fracción volumétrica gaseosa ( $\alpha$ ) y de la velocidad promedio de la perturbación ( $v$ ), las que a su vez son funciones de la posición axial del detector o altura  $h$ . En otras palabras, la fracción volumétrica gaseosa aumenta a lo largo del canal de medición (de abajo hacia arriba).

El esquema de flujo correspondiente a un flujo en ebullición moviéndose verticalmente hacia arriba en un canal sometido a altas temperaturas se muestra en la [Figura 1](#). En la ebullición parcial, una capa de líquido sobrecalentado existe cerca de la pared, mientras que el resto del líquido puede estar subenfriado. En el flujo bubbly, el gas está uniformemente distribuido en forma de burbujas discretas en una fase líquida continua. El flujo anular se caracteriza por la continuidad de la fase gaseosa en la región central del canal rodeado por un

anillo de líquido sobre las paredes del canal.

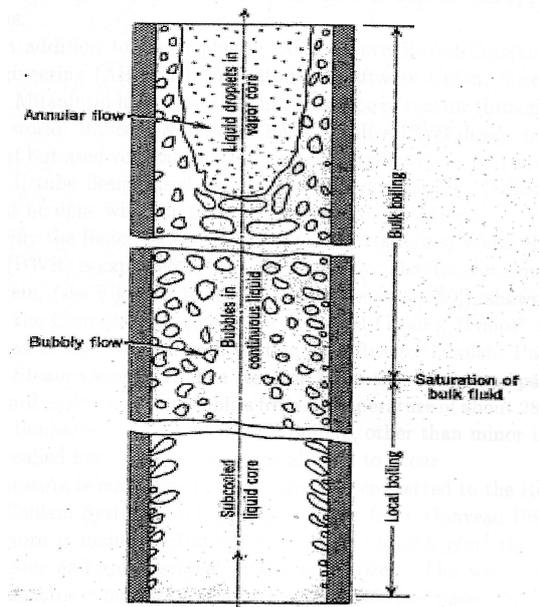


Figura 1: Esquema de flujos en un canal vertical

Para ver cambios de la intensidad de la fracción volumétrica de carga a lo largo del canal del reactor aplicamos el modelo bimodal del flujo a dos fases presentado por Kozma (1992 y 1995).

Este modelo se determina por los parámetros  $\mu_1, \mu_2, \sigma_1^2, \sigma_2^2$ . Los dos primeros parámetros son los valores esperados y los dos últimos son las varianzas del primer y segundo modo, respectivamente. Asumiendo que estos valores cumplen con la estadística de Bernoulli para el fluido a dos fases (mezcla bimodal), podemos escribir para el primero y el segundo modo, respectivamente

$$\sigma_1^2 = Na^2 \alpha_1 (1 - \alpha_1) + \sigma_{1bg}^2 \quad (1)$$

$$\sigma_2^2 = Na^2 \alpha_2 (1 - \alpha_1) + \sigma_{2bg}^2$$

donde  $\sigma_{ibg}^2 (i=1,2)$  es la componente de ruido de fondo,  $N$  es el número máximo posible de burbujas dentro del volumen de sensibilidad del detector y  $a$  es el cambio en la señal del detector causada por una sola burbuja. También, para los valores esperados tenemos

$$\mu_1 = Na \alpha_1 \quad (2)$$

$$\mu_2 = Na \alpha_2$$

Haciendo uso de las ecuaciones anteriores, obtenemos las siguientes expresiones para el valor esperado y la varianza de la mezcla bimodal

$$\begin{aligned} \mu_{BM} &= \alpha_L \mu_1 + (1 - \alpha_L) \mu_2 \\ \sigma_{BM}^2 &= \alpha_L \sigma_1^2 + (1 - \alpha_L) \sigma_2^2 + \alpha_L (1 - \alpha_L) (\mu_1 - \mu_2)^2 \end{aligned} \quad (3)$$

### 3 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los datos fueron obtenidos de una central nuclear de potencia de 900MW. Analizamos tres canales de instrumentación cuya posición radial se indica como 6, 12 y 13 en la [Figura 2](#). Esta ubicación es conveniente para el análisis ya que no es una zona periférica.

Los cuatro detectores están situados a diferentes alturas en un mismo canal de instrumentación, A, B, C y D, tal como indica la [Figura 2](#).

Analizamos dos conjuntos de datos: Conjunto de datos I, con componentes de baja frecuencia, hasta 2.5 Hz y Conjunto de datos II, con componentes de alta frecuencia, hasta 25 Hz.

Cada conjunto de datos de cada detector es representado por su correspondiente función de densidad de probabilidad (pdf). El NRMS integrado sobre todas las frecuencias es igual a la varianza de la función pdf.

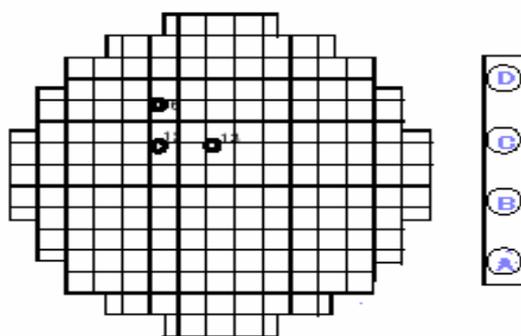


Figura 2: Núcleo del reactor y canal de instrumentación

Para realizar el ajuste bimodal del flujo a dos fases, primero definimos una función como función suma de dos funciones Gaussianas con valor esperado  $\mu_1$  y  $\mu_2$  y varianza  $\sigma_1^2$  y  $\sigma_2^2$ , respectivamente (ajuste que, a partir de la prueba de normalidad de Lilliefors mostró ser altamente significativo). Luego, resolvemos el problema de la curva de ajuste no lineal utilizando mínimos cuadrados y el método de Gauss Newton.

Con el objetivo de encontrar un indicador objetivo del flujo a dos fases, de las Ecuaciones (1) y (2) eliminamos la constante característica  $a$  y el ruido de fondo de cada detector y obtenemos

$$z = \frac{(\mu_1 - \mu_2)^2}{\sigma_1^2 - \sigma_2^2} \quad (4)$$

Podemos ver la dependencia de este parámetro con la posición del canal de instrumentación en las Tablas 1 y 2 para el caso de datos de baja frecuencia (Conjunto de datos I) y de alta frecuencia (Conjunto de datos II), respectivamente.

Las últimas dos columnas de las Tablas 1 y 2 se obtienen a partir de la prueba de normalidad que incluye el análisis Lilliefors.

Todos los cálculos fueron realizados en un entorno de Matlab, verificándose la hipótesis

nula para todos los casos, para los valores del estadístico  $l$  y del  $p$ -valor (la probabilidad de obtener el valor del estadístico) que figuran en las Tablas. Cuando el  $p$ -valor no está en el intervalo comprendido entre 0.01 y 0.2, lo denotamos  $p \gg$ .

Conjunto de Datos I							
Detectores	$\mu_1$	$\mu_2$	$\sigma_1$	$\sigma_2$	$z$	$l$	$p$
D	-0.54	1.00	1.05	0.99	19.2	0.0095	$p \gg$
C	-0.36	1.30	1.12	0.97	9.09	0.0112	0.068
B	-0.22	1.60	1.20	0.97	6.6	0.0133	0.026
A	0.04	1.80	1.35	1.02	4.4	0.0093	$p \gg$

Tabla 1: Ajuste Gaussiano de los cuatro detectores.

Conjunto de Datos II							
Detectores	$\mu_1$	$\mu_2$	$\sigma_1$	$\sigma_2$	$z$	$l$	$p$
D	-0.28	0.95	0.98	0.93	17.9	0.0098	$p \gg$
C	-0.47	0.95	1.03	0.94	11.9	0.0891	$p \gg$
B	-0.28	1.11	1.20	0.94	3.5	0.0253	0.104
A	0.14	1.20	1.20	0.94	3.2	0.0239	0.167

Tabla 2: Ajuste Gaussiano de los cuatro detectores.

En lo que respecta al cambio del parámetro  $z$  a lo largo del canal de instrumentación, éste depende, ciertamente, no sólo de la estructura del flujo sino también del número de burbujas.

#### 4 CONCLUSIONES

Luego del análisis de los datos tomados de una central nuclear de potencia de tres diferentes canales de instrumentación para distintas frecuencias, concluimos que el modelo bimodal, a pesar de ser simple, es un modelo más realista que describe el flujo a dos fases en el refrigerante de un reactor nuclear. Este modelo es aplicable para distintos valores de la fracción volumétrica gaseosa  $\alpha$  y converge al conocido modelo de Poisson para valores pequeños de  $\alpha$  (no mayores de 30 %).

Basados en este modelo simplificado,  $z$  es un parámetro indicativo de la estructura del flujo. Contiene información acerca del número máximo posible de burbujas en el volumen de sensibilidad del detector y es función de la fracción volumétrica gaseosa de los dos modos.

#### REFERENCIAS

- Analytis, G. Th., A Phenomenological Model for the Interpretation of Velocities Measured in BWRs by Cross-Correlation Techniques. *Annals of Nuclear Energy*, 9: 73-81, 1996.
- Atta, M. A., Fry, D. N., Mott, D. E., y King, W. T., Determination of Void Fraction Profile in Boiling Water Reactor Channel Using Neutron Noise Analysis. *Nucl. Science Eng.*, 66: 264-268, 1977.
- Chaudhary, V. N., Kulkarni, A.K, y Arora, K. K., Determination of Mass Flow Rates from Measured In-Core Two-Phase Flow Transit Times in a Boiling Water Reactor. *J. Nucl. Sci. Technol*, 32:5, 416-424, 1995.

- Ireland, K., y Stephens, A., Two-phase flow in a vertical annulus, [http://www.chemsoc.org/exemplarchem/entries/2002/Stephens\\_Ireland](http://www.chemsoc.org/exemplarchem/entries/2002/Stephens_Ireland), 2002.
- Kaji, M., Sawai, T., Mori, K., Yamauchi, S., y Nakanishi, S., Numerical Calculation of Forced Convection Heat Transfer to Annular Two-Phase Flow in a Evaporating Tube. *Proc. of the Second Int. Symp on Two-Phase Flow Modeling and Experimentation*, 1: 263-270, 1999.
- Kosály, G., On the physical meaning of the fluid velocity measured in BWRs by noise analysis. *Ann. Nucl. Energy*, 10: 675-676, 1983.
- Kozma, R., *Nuclear noise investigations on boiling effects in a simulated MTR-type fuel assembly*, Phd Thesis, Delft University of Technology, Delft, The Netherlands, 1992.
- Kozma, R., Studies on the relationship between the statistics of void fraction fluctuations and the parameters of two-phase flows. *Int. J. Multiphase Flow*, 21: 241-251, 1995.
- Lübbesmeyer, D., On the physical meaning of the fluid velocity measured in BWRs by noise analysis. *Ann. Nucl. Energy*, 10: 233-241, 1983.
- Mori, M., Washio, T., y Kitamura, M., Measurement Methods for Local and Total Flow Rate of Reactor Core by Analyzing LPRM Signals in BWR. *Proc. ICONE-3*, 1635-1640, 1995.
- Naito, N., Ando, Y., Yamamoto, F., y Takeuchi, E., Estimation of Fuel Channel Inlet Flow Rate by G. B. y Noise Analysis. *J. Nucl. Sci. Technol*, 17: 351-358, 1980.
- Roston, G. B., Martín, M. C., Ascheri, M. E., y Pizarro R., Estudio Matemático de las Fluctuaciones de Fracción Volumétrica Gaseosa en un Flujo a Dos Fases. *Mecánica Computacional*, 25: 133-138, 2006.
- Stekelenburg, A. J. C, y Van der Hagen, T. H. J., Two-phase Flow Monitoring by Analysis of In-core Neutron Detector Noise Analysis - Literature Survey. *Ann. Nucl. Energy*, 20: 611-617, 1993.
- Windecker, G., y Anglart, H., Phase distribution in a BWR fuel assembly and evaluation of a multidimensional multifield model. *Nuclear Technology*, 134: 49-61, 2001.