

ESTUDIO ESTADÍSTICO DE LA DINÁMICA DEL FLUJO A DOS FASES EN UN REACTOR NUCLEAR

Elisa M. Zemman^a, Graciela B. Roston^a

^a *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*

Palabras Claves: flujo a dos fases, modelo bimodal, estadística de Weibull.

Resumen: Considerando las diversas técnicas de monitoreo de las condiciones locales del refrigerante en un reactor nuclear vía el análisis de ruido neutrónico como un problema inverso, es posible formular una aproximación sistemática para correlacionar y/o evaluar técnicas diferentes entre sí. En trabajos previos, analizamos y comparamos distintos modelos matemáticos que describen las fluctuaciones de la fracción volumétrica gaseosa en un flujo a dos fases.

En éste trabajo, analizamos el comportamiento de la función de densidad de probabilidad (pdf) para un conjunto de datos de cada uno de los cuatro detectores situados a diferentes alturas en un mismo canal de instrumentación. Teniendo en cuenta las estadísticas de Bernoulli, q-estadística y Weibull encontramos que esta última, es la que mejor describe la dinámica del flujo a dos fases en un reactor nuclear usando datos obtenidos de una central nuclear de potencia.

1 INTRODUCCIÓN

El estudio del flujo a dos fases es relevante para diversas disciplinas científicas y/o técnicas, desde investigación en ingeniería medioambiental hasta la caracterización del flujo en condiciones normales de operación o accidentes en los procesos nucleares, químicos o ingeniería de procesos. Durante mucho tiempo, el análisis del flujo a dos fases sólo se limitó a describir correlaciones empíricas. Esta situación cambió en las tres últimas décadas y se ha dedicado mucho esfuerzo para el análisis y la caracterización de los sistemas de flujo a dos fases y para el desarrollo de métodos numéricos de simulación.

En los sistemas de flujo a dos fases la información acerca de la fracción volumétrica gaseosa juega un papel fundamental en el diseño y la operación de sistemas. Por ejemplo, en un reactor nuclear el conocimiento de la fracción volumétrica gaseosa es importante ya que la dinámica de la planta nuclear puede cambiar significativamente cuando ésta aumenta. Además, como estos cambios afectan las características de la transferencia de calor y la caída de presión en el refrigerante del reactor, puede influenciar también la distribución de flujo neutrónico y desestabilizar la distribución de potencias del reactor (Glasstone, 1990).

A pesar del progreso alcanzado, en general, se acepta que la tecnología de reactores nucleares está todavía en su infancia. Esto se debe, por un lado, a que la aceptación social de la industria nuclear es muy pobre debido a razones políticas e históricas y, por otro, a las implicancias de esta cuestión en la seguridad pública y en el medio ambiente. Muchas etapas habrán de recorrerse, antes de que pueda fijarse con rigor la potencialidad a largo plazo de los diferentes tipos de reactores.

El monitoreo de las condiciones locales del flujo refrigerante es de suma importancia para una segura y eficiente operación en reactores; se pueden así verificar las condiciones normales en operación y detectar condiciones anómalas. Más aún, estos datos pueden ser usados en la validación de los códigos computacionales.

El Análisis de Fluctuación de Señales es una técnica confiable, segura y de bajo costo para estudiar las condiciones locales del flujo a dos fases de un BWR (Boiling Water Reactor) (Thie, 1981), pudiendo caracterizarse propiedades relevantes del flujo tales como la propagación, estructura y dinámica del flujo. Su implementación requiere de un cuidadoso procesamiento de las señales y una buena interpretación física de los resultados.

Las fluctuaciones en los componentes internos de un reactor nuclear (refrigerante o material estructural) originan fluctuaciones en el flujo neutrónico que son específicas para un fenómeno en particular (Lewis, 2008). La siguiente ecuación expresa de una manera matemática formal, la relación causa-efecto entre una perturbación $S(r', w)$ y la fluctuación neutrónica medida $\Phi(r, w)$ en la posición r y a la frecuencia w .

$$\Phi(r, w) = \int_{V_R} G(r, r', w) S(r', w) dr' \quad (1)$$

Esta fórmula unificada nos permite considerar varias técnicas de monitoreo de los componentes internos de un reactor nuclear vía análisis de Fluctuación de Señales como un problema inverso que puede ser planteado (Tarantola, 1987) como un problema que combine la siguiente información: a) los resultados de los parámetros observables medidos; b) información a priori de los parámetros del modelo y c) información de las correlaciones físicas entre los parámetros observados y los parámetros del modelo.

Menke (1989) expresa que el problema inverso es simplemente el conjunto de métodos usados para extraer información útil del entorno a partir de medidas físicas o datos. La información útil es especificada como valores numéricos de alguna propiedad de este entorno. El problema inverso contrasta con el problema directo donde se predicen los datos a partir de los parámetros y de un modelo.

Planteamos un estudio fenomenológico del problema a partir de la siguiente pregunta: ¿en qué forma podemos modificar la información a priori de algunos parámetros del modelo, a partir de inciertos resultados de algún experimento y dada una ley física relativamente incierta que relaciona los parámetros observables con los del modelo?

Nuestro objetivo es extraer información de la componente fluctuante “real” que viaja desde abajo hacia arriba en el canal de instrumentación. Las fluctuaciones de fracción volumétrica gaseosa α (definida como el cociente entre el volumen gaseoso de la mezcla vapor-líquido y el volumen total de la mezcla) en el refrigerante perturban los parámetros en el núcleo del reactor y generan cambios de flujo que, a su vez, causan fluctuaciones en la señal del detector neutrónico.

En trabajos previos (Roston et al, 2007) con datos obtenidos de una central nuclear de potencia en operación, analizamos y comparamos distintos modelos matemáticos para estudiar los cambios de intensidad de las fluctuaciones de la fracción volumétrica gaseosa en tres distintos canales de instrumentación para distintas frecuencias.

Las discrepancias entre los valores experimentales observados de la componente fluctuante en el canal de instrumentación y los valores que se predicen usando los diferentes modelos teóricos, aun existen y podrían llegar a reducirse si enfocamos nuestra atención en una componente de una señal específica, la cual representa el fenómeno de interés.

En este trabajo, usando datos obtenidos de una central nuclear de potencia, analizamos el comportamiento de la función de densidad de probabilidad (pdf) para un conjunto de datos de cada uno de los cuatro detectores neutrónicos situados a diferentes alturas en un mismo canal de instrumentación. Teniendo en cuenta las estadísticas de Bernoulli, q-estadística y Weibull encontramos que esta última, es, a nuestro criterio, la que mejor describe la dinámica del flujo a dos fases en un reactor nuclear.

2 TEORÍA

Para calcular la fracción de neutrones δR en un detector neutrónico ante la fluctuación arbitraria de la densidad $\delta\rho(r, w)$ (Stekelenburg et al., 1993) usamos la siguiente expresión:

$$\delta R(w) = \iiint dV dE d\Omega \Sigma_d(r, E) \delta\phi(r, w, E, \Omega) \quad (2)$$

donde w es la frecuencia angular, V es el volumen de integración, E es la energía de los neutrones, Ω es la dirección del ángulo sólido, $\Sigma_d(r, E)$ es la sección eficaz macroscópica del detector y $\phi(r, w, E, \Omega)$ es la densidad de flujo neutrónico. Definiendo una función de peso apropiada $F(r, w)$ obtenemos

$$\delta R(w) = \int dV F(r, w) \delta\rho(r, w) \quad (3)$$

Por lo tanto, integrando todas las densidades de ruido de la fuente, pesadas por una función F , sobre todo el volumen del núcleo podemos calcular la fluctuación esperada de la señal a partir de una dada distribución de ruido en una fuente.

La fluctuación de densidad de la fuente $\delta\rho(r, w)$ se considera la componente fluctuante viajera. Si consideramos la fracción volumétrica gaseosa entre dos diferentes posiciones, r y r'

, podemos generalizar la Ecuación (3) para volver a obtener la Ecuación (1).

Cuando una señal del detector es analizada, se puede obtener la fluctuación de densidad a partir de la señal medida. En un trabajo anterior (Roston et al, 2008) presentamos un método basado en la función coherencia entre las señales, para estimar el tiempo de retardo entre dos detectores separados axialmente en un mismo canal de instrumentación.

Para ver cambios de la intensidad de la fracción volumétrica gaseosa a lo largo del canal de instrumentación del reactor se han aplicado diferentes modelos. El modelo de Poisson (Barlow, 1989) es un modelo muy simplificado el cual no tiene en cuenta correlaciones entre las fluctuaciones de fracción volumétrica gaseosa en diferentes posiciones del canal y sólo es aplicable para valores bajos de α (hasta un 30%) (Kósalý et al, 1975), mientras que el de Bernoulli modificado es también válido para valores altos de α . En este modelo, presentado por Kozma (1992 y 1995), se incorporaron ciertas correlaciones temporales y se tuvo en cuenta que la fluctuación bimodal de las señales neutrónicas era generada por un flujo a dos fases bimodal.

Con el fin de realizar un ajuste bimodal de la función de densidad de probabilidad analizamos diferentes estadísticas. La función pdf es la densidad relativa con la que los valores aparecen en el conjunto de datos, y es una estimación de la tasa de cambio de la probabilidad con la magnitud que se está midiendo.

En un principio supusimos que la pdf tenía un comportamiento de una q -exponencial.

La función q -exponencial,

$$\exp_q(x) = [1 + (1 - q)x]^{1/(1-q)} \quad (4)$$

es una generalización de la función exponencial, introducida por Constantino Tsallis (Tsallis, 1988). En el límite cuando $q \rightarrow 1$, se recobra la función exponencial, $\exp_1(x) = \exp(x)$. La inversa de la función q -exponencial, es la función q -logaritmo:

$$\ln_q(x) = \frac{1 - x^{1-q}}{q - 1} \quad (5)$$

la cual, en el límite $q \rightarrow 1$ coincide con la función logaritmo, $\ln_1(x) = \ln(x)$.

En la siguiente sección probaremos que, para nuestro caso particular, el valor de q es igual a la unidad.

La distribución que mejor describe la dinámica de nuestro problema es la distribución de Weibull. Esta distribución complementa a la distribución exponencial y a la normal, y en general se usa en casos de mortalidad infantil, transiciones de fase, envejecimiento operacional y de fallas aleatorias, entre otros. Su función densidad de probabilidad es la siguiente

$$f(x) = \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{x}{\beta} \right)^{\beta-1} \exp \left[- \left(\frac{x}{\eta} \right)^\beta \right] \quad (6)$$

donde x es la variable aleatoria, η es un parámetro de escala y β es un factor de forma. η y β son parámetros positivos.

En esta última expresión podemos definir

$$R(x) = \exp \left[- \left(\frac{x}{\eta} \right)^\beta \right] \quad (7)$$

donde $R(x)$ es la función fiabilidad, también llamada probabilidad de supervivencia.

Dada $R(x)$ podemos definir la función infiability $F(x)$ como

$$F(x) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{x}{\eta}\right)^\beta\right] \quad (8)$$

3 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los datos fueron tomados de una central nuclear de potencia de 900MW, de cuatro detectores A, B, C y D, situados a diferentes alturas en un mismo canal de instrumentación.

El canal de instrumentación que fue analizado no se encuentra en una zona periférica.

Una parte de los datos analizados (5880 a una frecuencia de 5Hz) están representados en la [Figura 1](#). En esta figura, en el eje de las ordenadas esta representada la fluctuación neutrónica medida en unidades arbitrarias y, en el eje de las abscisas, 1000 de los 5880 con los que se cuenta a una frecuencia de 5 Hz.

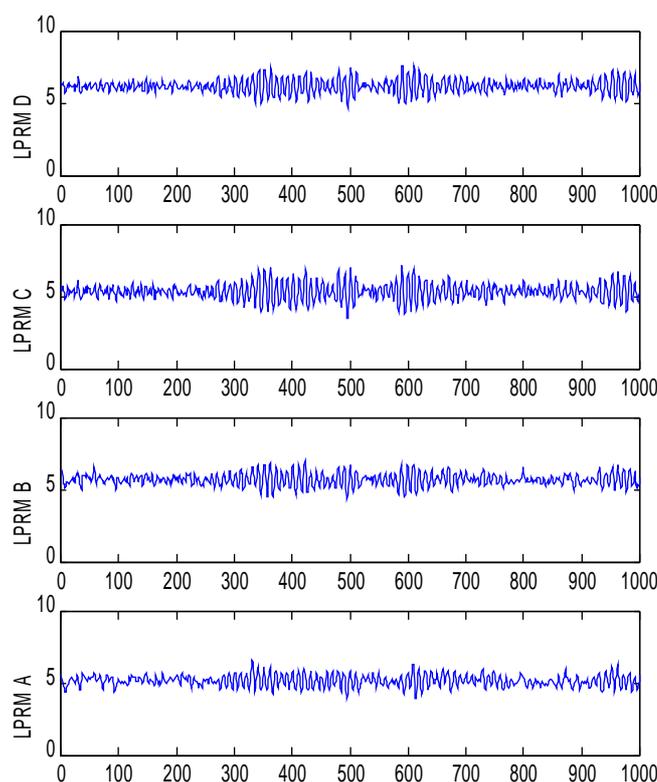


Figura 1: Parte de los datos analizados detectores neutrónicos ubicados en la posición A, B, C, y D respectivamente.

Para realizar el ajuste bimodal del flujo a dos fases, primero utilizamos un método numérico para ajustar los datos $(pdf(x), x)$ a una q -exponencial. Hallamos de manera exploratoria un valor de q para el cual ese conjunto de datos confirma aproximadamente una línea recta en un gráfico $\ln_q(pdf(x))$ vs x para, recurriendo luego a un método iterativo, variar q . Ajustamos cada valor de q a una recta usando el método de mínimos cuadrados; obteniendo un coeficiente de correlación r^2 y, seleccionando el valor de q para el cual r^2 es mayor

(Walpole, 1992).

Finalmente obtuvimos que el valor óptimo de q , para los cuatro detectores es el mismo, el primer valor asignado a la iteración. Es decir, las fluctuaciones de la fracción volumétrica gaseosa en un mismo canal de instrumentación no presentan un comportamiento q-exponencial.

Para analizar la distribución de Weibull partimos de la Ecuación (8) y después de reacomodar los términos y tomar dos veces el logaritmo neperiano obtenemos

$$\ln(\ln(1/[1 - F(x)])) = \beta \ln(x) - \beta \ln(\eta) \quad (9)$$

Por lo tanto, cualquier grupo de datos que siga la distribución de Weibull se puede representar por una línea recta en un gráfico ln-ln, partiendo de la hipótesis de que el origen es perfectamente conocido y que coincide con los datos experimentales.

Observando la Figura 2 podemos inferir que esta distribución se adapta a las fluctuaciones de la fracción volumétrica gaseosa en un flujo a dos fases.

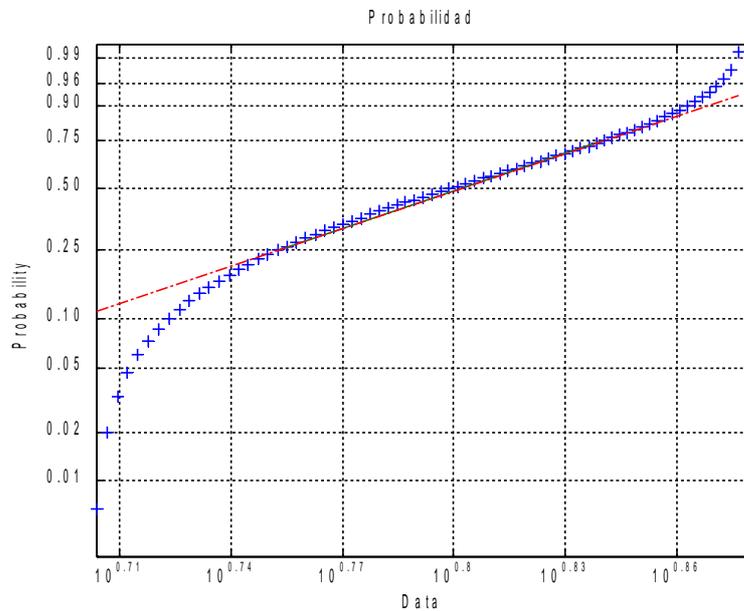


Figura 2: Gráfico ln- ln de la función de probabilidad acumulada en función de los datos experimentales

Una vez hallados para cada detector los valores de los parámetros η y β , característicos del modelo propuesto, confeccionamos la Tabla 1 y graficamos la función densidad de probabilidad de Weibull para cada uno de los detectores (ver Figura 3).

<i>Señal</i>	<i>Coficiente η</i>	<i>Coficiente β</i>
Detector A	6.6152	9.8516
Detector B	5.9057	7.6875
Detector C	6.0624	10.1762
Detector D	5.3972	10.1564

Tabla 1: Parámetro de escala η y factor de forma β para los cuatro detectores

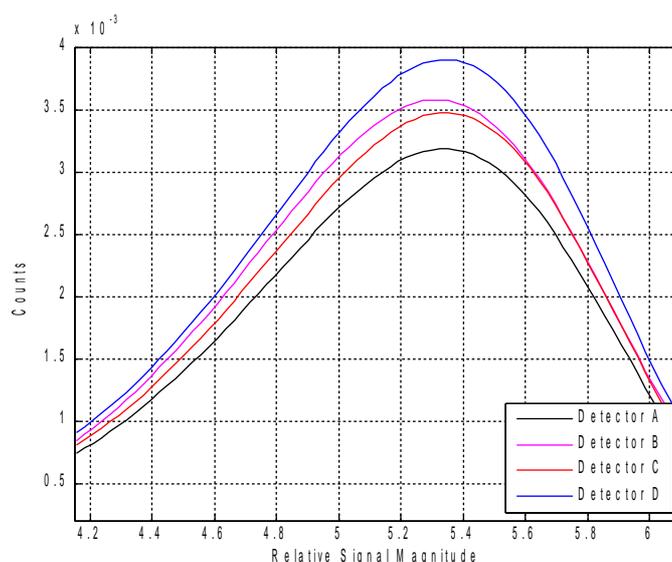


Figura 3: Gráfico de la función densidad de probabilidad para cada uno de los detectores

En el eje de las abscisas de la **Figura 3** está representada la fluctuación neutrónica medida en unidades arbitrarias y, en el eje de las ordenadas, el número de conteos por segundo de los detectores neutrónicos ubicados en la posición A, B, C, y D respectivamente. Podemos observar, que, a medida que aumenta la altura a la que están situados los detectores neutrónicos en el canal de instrumentación la función densidad de probabilidad también varía.

Un trabajo futuro está orientado a trabajar con más canales de instrumentación y, en la medida de lo posible, con datos de otros reactores nucleares. Por otro lado, es necesario un análisis más exhaustivo de los parámetros de Weibull a través de los cuales podríamos inferir propiedades de la fracción volumétrica gaseosa α .

4 CONCLUSIONES

Con el fin de realizar un ajuste bimodal de la función de densidad de probabilidad para un conjunto de datos de cada uno de los cuatro detectores situados a diferentes alturas en un mismo canal de instrumentación, analizamos diferentes estadísticas.

Teniendo en cuenta la q-estadística probamos que las fluctuaciones de la fracción volumétrica gaseosa en un mismo canal de instrumentación no presentan un comportamiento q- exponencial. La estadística de Weibull resultó ser la que mejor describe la dinámica del flujo a dos fases en un reactor nuclear, usando datos obtenidos de una central nuclear de potencia.

REFERENCIAS

- Barlow R. J., *Statistics, a Guide to the use statistical methods in the physical sciences*, John Wileys & Sons Ltd., 1989.
- Glasstone, S. y Sesonske, A., *Ingeniería de reactores nucleares*, Editorial Reverté, 1990.
- Kosály G., Maróti L. y Meskó L. A Simple Space Dependent Theory of Neutron Noise in a Boiling Water Reactor. *Ann. Nucl. Energy*, 2, pp. 315-321, 1975.
- 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.
- Lewis E. E., *Fundamentals of Nuclear Reactor Physics*, Academic Press, Reino Unido, 2008.
- Menke W., *Geophysical data analysis: discrete inverse theory*, Academic Press, California, Estados Unidos, 1989.
- Roston G. B., Ascheri, M. E., Martín, M. C. y Pizarro R., Análisis del modelo bimodal en las fluctuaciones de fracción volumétrica gaseosa en un flujo a dos fases, *Mecánica Computacional*, 26: 1741-1746, 2007.
- Roston G. B., Ascheri, M. E., Martín, M. C. y Pizarro R., Acerca de la propagación del flujo a dos fases en un reactor nuclear, *Mecánica Computacional*, 27: 2839-2846, 2008.
- Tarantola A., *Inverse Problem Theory, Methods for data filtering and model parameter estimation*, Elsevier Science Publishing Company Inc., 1987.
- Thie J., *Power Reactor Noise*, American Nuclear Society, 1981.
- Tsallis C., Possible generalization of Boltzmann-Gibbs statistic”, *Journal of Statistical Physics*, 52:479-487, 1988.
- Stekelenburg A. J. C. y Van der Hagen T. H. J. J. Two-phase Flow Monitoring by Analysis of In-core Neutron Detector Noise Analysis - Literature Survey. *Ann. Nucl. Energy*, 20: 611-617, 1993.
- Walpole R. y Myers R., *Probabilidad y Estadística*, 4ª Ed. McGraw Hill, México, 1992.