

## ACERCA DE LA PROPAGACIÓN DEL FLUJO A DOS FASES EN UN REACTOR NUCLEAR

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

**Palabras Claves:** flujo a dos fases, función coherencia, tiempo de retardo.

**Resumen:** Las fluctuaciones en los internos de un reactor nuclear (refrigerante o material estructural) inducidas por varios procesos tecnológicos, originan fluctuaciones en el flujo neutrónico que son específicas para un fenómeno en particular. Mediante el análisis de estas fluctuaciones neutrónicas inducidas, se pueden caracterizar propiedades relevantes del flujo a dos fases tales como propagación, estructura y dinámica del flujo.

Considerando las diversas técnicas de monitoreo de las condiciones locales del refrigerante vía el análisis de ruido neutrónico como un problema inverso, podemos formular una aproximación sistemática para correlacionar y/o evaluar técnicas diferentes entre sí. Llevamos a cabo un estudio fenomenológico del problema para entender el comportamiento de la componente fluctuante *efectiva* y poder así, extraer información de esta componente viajera.

En trabajos previos analizamos distintos modelos matemáticos que describen las fluctuaciones de fracción volumétrica gaseosa en un flujo a dos fases.

En este trabajo 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.

## 1 INTRODUCCIÓN

La cuestión de la seguridad ocupa un lugar preponderante en todos los productos fabricados por el hombre, sobretodo en lo que respecta a la seguridad en la industria nuclear. Esto se debe, por un lado, a que la aceptación social de este tipo de industria 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. Conceptos tales como seguridad en el diseño y cultura de la seguridad son, sin ninguna duda, necesarios.

Como es imposible para un diseñador prevenir todos los posibles modos de fallas de componentes, sensores u operadores es más realista prestar atención al concepto de la seguridad operacional: el diagnóstico y la detección de fallas tempranas mediante sistemas avanzados de instrumentación. Obviamente, una forma de lograr este objetivo es mediante el desarrollo y la instrumentación de sistemas de monitoreo con un propósito específico.

Sería lógico pensar que un incremento en la seguridad y eficiencia de una central nuclear de potencia implica la construcción de instrumentación adicional y control de equipamientos que permita la múltiple redundancia en el control y la seguridad. Sin embargo, la instalación de nuevas herramientas en la planta genera una mayor inversión de capitales, mayor complejidad en las señales y en el cableado instrumental y un esfuerzo extra del personal en la operación y el mantenimiento.

Es ciertamente más realista y razonable tratar de extraer la mayor cantidad de información relacionada a fallas tempranas y cambios de estado de la planta, mediante el análisis detallado de las señales disponibles en la misma. Esta técnica se denomina Análisis de Ruido Neutrónico o Análisis de Fluctuación de Señales e involucra información de componentes de una señal que varía con el tiempo (random component). Su implementación requiere de un cuidadoso procesamiento de las señales y una buena interpretación física de los resultados. A pesar de que esta técnica ha sido usada por más de 35 años, aún existen significativas discrepancias entre los modelos teóricos y los datos experimentales.

Las fluctuaciones en los componentes internos de un reactor nuclear (refrigerante o material estructural) inducidas por varios procesos tecnológicos, originan fluctuaciones en el flujo neutrónico que son específicas para un fenómeno en particular. Cualquier perturbación que lo aleje de los valores normales, tal como vibraciones, ebullición y transporte del fluido a dos fases, fluctuaciones de la fracción volumétrica gaseosa, constituye una fluctuación espacio-tiempo que depende de la sección eficaz local macroscópica de los detectores neutrónicos. De esta manera, para cualquier perturbación (fuente de ruido) la fluctuación de señales inducida, en principio, puede ser determinada. La ecuación básica que describe este fenómeno es la siguiente:

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

Esta ecuación expresa, de una manera matemática formal, la relación causa-efecto entre la fuente de ruido  $S(r', w)$  y la fluctuación neutrónica medida  $\Phi(r, w)$  en la posición  $r$  y a la frecuencia  $w$ .

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, y formular una aproximación sistemática para correlacionar y/o evaluar técnicas diferentes entre sí.

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 en un BWR (Boiling Water Reactor).

Mediante el análisis de las fluctuaciones neutrónicas inducidas, se caracterizan propiedades relevantes del flujo tales como propagación, estructura y dinámica del flujo.

La propagación está caracterizada por el tiempo de retardo existente entre dos detectores separados axialmente. La cantidad que se propaga es la fluctuación de la densidad de flujo. Un método muy conocido para la medición del tiempo de retardo es la aplicación de la técnica de Correlación Cruzada. En esta aplicación, las fluctuaciones del coeficiente volumétrico de vacío  $\alpha$  (definido 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. Está empíricamente comprobado que se puede obtener el tiempo de retardo o la velocidad (si se tiene la distancia entre los detectores) mediante este método u otro básicamente equivalente denominado Análisis Cruzado de Espectros.

Volviendo a la Ecuación (1), en forma general, un problema inverso 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.

Dada una cierta cantidad de información a priori de algunos parámetros del modelo, y dada una ley física relativamente incierta que relaciona los parámetros observables con los del modelo, ¿en qué forma podemos modificar la información a priori, dados los inciertos resultados de algún experimento? A partir de esta pregunta planteamos un estudio fenomenológico del problema. Nuestro objetivo es entender un poco más acerca de la componente fluctuante *real* y, también, extraer información de esta componente que viaja desde abajo hacia arriba en el canal de instrumentación.

En trabajos previos (Roston et al., 2007) analizamos distintos modelos matemáticos que describen las fluctuaciones de fracción volumétrica gaseosa en un flujo a dos fases. Mediante la comparación de estos modelos, se obtuvo un modelo adecuado para la estimación de la fracción volumétrica gaseosa, el modelo bimodal (Kozma, 1995), el cual, 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 %).

En este trabajo 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.

## 2 TEORÍA

Existe un método sólido para calcular la fracción de neutrones  $\delta R$  en un detector neutrónico ante la fluctuación arbitraria de la densidad  $\delta\rho(r, w)$  (Stekelenburg et al., 1993):

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

donde  $w$  es la frecuencia angular,  $V$  es el volumen de integración,  $E$  es la energía de los neutrones,  $\Omega$  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. Si definimos una función de peso apropiada  $F(r, w)$  podremos reescribir la última ecuación como

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

Por lo tanto, para el cálculo de fluctuación esperada de la señal a partir de una dada distribución de ruido en una fuente, debemos integrar todas las densidades de ruido de la fuente, pesadas por una función  $F$ , sobre todo el volumen del núcleo.

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. Sin embargo, sin cierta información a priori de las características peculiares de la fluctuación de densidad y el conocimiento de la función  $F(r, w)$  no es posible resolver el problema inverso.

La estimación del tiempo de retardo a través del método de Correlación Cruzada se torna incierta cuando las señales involucradas están dominadas por una componente fluctuante periódica. Éste es nuestro caso, por lo tanto es conveniente usar el método Análisis Cruzado de Espectros (Jenkins y Watts, 1968, Thie, 1981).

En particular, el tiempo de retardo se estima a partir del ángulo de fase de la función compleja definida por:

$$S_{xy}(f) = \frac{1}{T} X^*(f) Y(f) \quad (4)$$

donde el símbolo \* indica complejo conjugado y  $X(f)$  e  $Y(f)$  son las transformadas de Fourier de las señales  $x(t)$  e  $y(t)$  respectivamente (Box y Jenkins, 1976, Hamilton, 1994). Las fórmulas para  $x(t)$  en el dominio temporal y  $X(f)$  en el dominio de las frecuencias pueden escribirse como:

$$x(t) = \int_{-\infty}^{\infty} X(f) \text{Exp}(i\omega t) df \quad (5)$$

$$X(f) = \lim_{T \rightarrow \infty} \int_{-T/2}^{T/2} x(t) \text{Exp}(-i\omega t) dt \quad (6)$$

El ángulo de fase de esta función esta dado por

$$\theta(f) = \text{Exp}[-i2\pi f \tau] \quad (7)$$

De esta expresión podemos calcular  $\tau$

$$\tau = -\frac{1}{2\pi} \frac{d\theta(f)}{df} \quad (8)$$

La Ecuación (8) indica que el tiempo de retardo  $\tau$  está dado por la pendiente del ángulo de fase. En el análisis de la fluctuación de señales del reactor,  $y(t)$  contiene no solamente  $x(t + \tau)$  sino también otras componentes, posiblemente independientes de  $x(t)$ .

Resulta claro que la eficacia de este método depende fuertemente de la intensidad relativa de la componente de retardo en la fluctuación de la señal completa. Se obtiene información acerca de esta relativa intensidad a través de una función llamada coherencia definida por

$$\gamma^2(f) = \frac{\|S_{xy}(f)\|}{S_{xx}(f)S_{yy}(f)} \quad (9)$$

En otras palabras, la función coherencia es una medida de cuánto se puede predecir  $y(t)$  a partir de  $x(t)$ , o viceversa. Teniendo en cuenta la última Ecuación, para un intervalo de frecuencia dado, los valores de coherencia promedio pueden calcularse a partir de

$$\bar{\gamma}^2 = \frac{1}{f_2 - f_1} \int_{f_1}^{f_2} \gamma^2 df \quad (10)$$

El ángulo de fase se calcula en un intervalo de frecuencia correspondiente a valores de coherencia mayores que  $\gamma_L^2$ .

Este método propuesto lo denominamos método basado en la función coherencia, en el dominio de las frecuencias.

### 3 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los datos fueron tomados de una central nuclear de potencia de 900MW, de cuatro detectores situados a diferentes alturas en un mismo canal de instrumentación, A, B, C y D, tal como indica la [Figura 1](#).

La posición radial de los canales de instrumentación está indicada como 6, 12 y 13. Esta ubicación es conveniente para el análisis ya que no es una zona periférica.

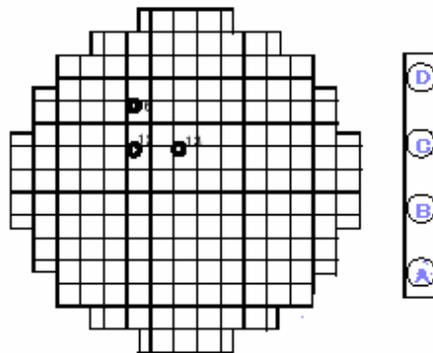


Figura 1: Núcleo del reactor y canal de instrumentación

Una parte de los datos analizados correspondientes a la posición radial 6, están representados en la [Figura 2](#). 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, el número de conteos por segundo de los detectores neutrónicos ubicados en la posición A, B, C y D respectivamente.

En general, un detector neutrónico dentro del reactor se verá influenciado por la suma de efectos locales y globales debidos a la componente de la fracción volumétrica gaseosa local, cerca del detector y la componente global sobre todo el núcleo. En nuestro análisis llevamos a cabo un preprocesamiento de las señales que consiste en sustraer, a cada señal del detector, el promedio de los 4 detectores en el mismo canal.

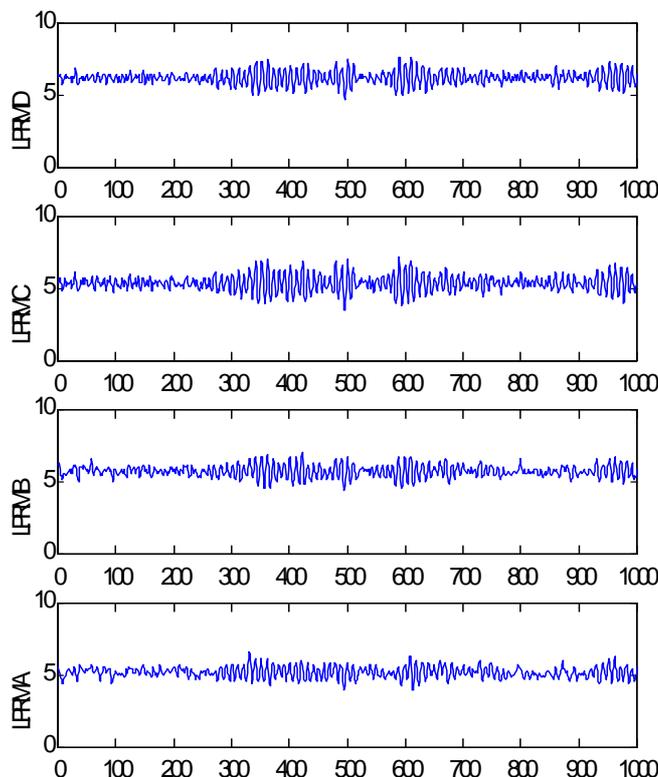


Figura 2: Parte de los datos analizados detectores neutrónicos ubicados en la posición A, B, C, y D respectivamente.

En nuestro caso, la frecuencia de muestreo es tan pequeña que hace difícil obtener una buena resolución usando la técnica de Correlación Cruzada. Más aún, los resultados obtenidos usando esta técnica no cumplen con la propiedad de aditividad del tiempo de retardo. Aditividad significa:

$$T_{AB} + T_{BC} = T_{AC} \quad (11)$$

donde  $T_{AB}$  es el tiempo de retardo entre los detectores A y B en el mismo canal de instrumentación. Como otra evidencia de la interpretación del tiempo de retardo, [Mori et al. \(1995\)](#) encontraron una inconsistencia lógica entre el tiempo de retardo medido con la técnica de Correlación Cruzada para diferentes combinaciones de detectores neutrónicos en un mismo canal de instrumentación.

<i>Señal</i>	<i>Método 1 t(seg)</i>	<i>Método 2 t(seg)</i>
Detectores CD	0.38	0.2
Detectores BC	0.42	0.4
Detectores BD	0.90	0.8
Detectores AB	0.34	0.4
Detectores AC	0.75	1.0
Detectores AD	0.61	1.4

Tabla 1: Tiempo de retardo para los cuatro detectores usando los dos métodos.

La **Tabla 1** muestra los tiempos de retardo para los cuatro detectores en la posición radial 6 luego de preprocesarlas usando el método basado en la función coherencia (Método 1) y el método de Correlación Cruzada (Método 2). Es necesario aclarar, que, cuando las señales no fueron preprocesadas no se pudo calcular el tiempo de retardo usando la técnica de Correlación Cruzada.

Como se observa de la **Tabla 1**, los resultados obtenidos a partir de la aplicación del Método 2 no cumplen con la propiedad de aditividad del tiempo de retardo. Si las señales de los 4 detectores miden un único tiempo físico, los valores medidos deberían ser consistentes con la propiedad de aditividad.

Por esta razón aplicamos el método basado en la función coherencia, en el dominio de las frecuencias que fuera explicado en la sección anterior. Basados en el hecho que la función coherencia  $\gamma^2 = 0$  corresponde a una independencia lineal entre las señales analizadas, mientras  $\gamma^2 = 1$  indica total dependencia, en nuestro caso, tomamos como valor mínimo de correlación entre las señales  $\gamma_L^2 = 0.4$ .

A modo de ejemplo, la **Tabla 2** muestra el tiempo de retardo obtenido entre los detectores D y C, para diferentes intervalos de frecuencia, teniendo en cuenta los valores de la función coherencia para datos analizados correspondientes a la posición radial 6.

<i>Intervalo de frecuencia (Hz)</i>	<i>Coherencia</i>	<i>Tiempo (seg)</i>
0:0.4	0.68	0.31
0.4:1.2	0.73	0.44
1.2:2.1	0.49	0.36

Tabla 2: Tiempo de retardo entre los detectores D y C

Por otro lado, la **Tabla 3** muestra el tiempo de retardo a lo largo del canal de instrumentación obtenido a partir del método propuesto, datos analizados correspondientes a la posición radial 12. Los intervalos de frecuencia analizados no coinciden para diferentes posiciones radiales porque ellos dependen de los valores de la función coherencia de las señales.

<i>Señal</i>	<i>Intervalo 0.1:0.4 Hz</i>	<i>Intervalo 0.6:1.0 Hz</i>	<i>Intervalo 1.0:2.0 Hz</i>
Detectores DC	0.31	0.43	0.38
Detectores CB	0.40	0.40	0.42
Detectores DB	0.76	1.41	0.90

Tabla 3: Tiempo de retardo a lo largo del canal de instrumentación

#### 4 CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos del tiempo de retardo entre dos detectores en un mismo canal de instrumentación fueron mejorados al aplicar el método propuesto basado en la función coherencia, en el dominio de las frecuencias. En este sentido, se obtuvo una mejor aproximación de la propiedad de aditividad del tiempo de retardo.

Más aún, es posible usarlo cuando la frecuencia de muestreo es pequeña y no se puede obtener buena resolución usando la técnica de Correlación Cruzada.

Debido al preprocesamiento de la señal, el intervalo de frecuencia de los valores que poseen

alta coherencia aumenta. Esta técnica también permite obtener una mejor resolución en la linealidad del ángulo de fase.

A pesar de que el método propuesto es bastante simple, los resultados obtenidos sugieren que 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, podrían llegar a reducirse si enfocamos nuestra atención en una componente de una señal específica, la cual representa el fenómeno de interés.

## REFERENCIAS

- Box, G.E.P. y Jenkins, G. M., *Time Series Analysis, forecasting and control*, Holden Day, San Francisco, 1976.
- Hamilton, J.D., *Time Series Analysis*, Princeton University Press, Princeton, New Jersey, 1994.
- Jenkins, G.M. y Watts, D.G., *Spectral Analysis and its applications*, Holden Day, San Francisco, 1968.
- 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.
- 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*, 3, 1635-1640, 1995.
- 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.
- 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.
- Tarantola, A., *Inverse Problem Theory, Methods for data filtering and model parameter estimation*, Elsevier Science Publishing Company Inc., 1987.
- Thie, J., *Power Reactor Noise* 159, American Nuclear Society, 1981