

# USO DE LA REDUNDANCIA DE SENSORES PARA LA DETECCIÓN TEMPRANA DE MALFUNCIONES

J. L. Fernández Marrón  
E.T.S.I. de Informática, UNED, C/Juan del Rosal 16, 28040 Madrid,  
[jmarron@dia.uned.es](mailto:jmarron@dia.uned.es)

Juan Blázquez Martínez, José Miguel Barcala Riveira  
CIEMAT, Avda. Complutense, 22, Madrid-28040,  
[juan.blazquez@ciemat.es](mailto:juan.blazquez@ciemat.es), [miguel.barcala@ciemat.es](mailto:miguel.barcala@ciemat.es)

## Resumen

*Las Plantas Industriales requieren de los sensores pertinentes para su control y supervisión. En el caso de Centrales Nucleares, los sensores de neutrones juegan un papel relevante.*

*En este trabajo dispusimos de las medidas neutrónica de una Planta Nuclear del tipo PWR/KWU. Los detectores de neutrones son del tipo SPWR (Self Power Neutron Detecto) y están dispuestos en columnas. El hecho de disponer de un colectivo de sensores permite utilizar la redundancia para la vigilancia del buen funcionamiento de los mismos.*

*En este caso usaremos la idea general de comparar un sensor con la media aritmética de los restante. Esta redundancia nos permitirá detectar anomalías incipientes en los sensores, aunque éstas se produzcan por debajo del nivel del ruido. Aquellos sensores que tengan derivas mesurables no deberían formar parte de la Lógica de Seguridad de la Planta.*

*Se usan técnicas de análisis de desviación típica para identificar si el sensor tiene una deriva.*

**Palabras Clave:** Malfunción Sensores, Análisis estadístico, Validación de datos adquiridos.

## 1 INTRODUCCIÓN

Las Plantas Industriales requieren de los sensores pertinentes para su control y supervisión. En el caso de Centrales Nucleares, los sensores de neutrones juegan un papel relevante. Se utilizan principalmente para el control de la potencia, para fines de Seguridad Nuclear y como soporte a los cálculos de quemado de combustible [1, 2 ,3].

En este caso se dispone de las medidas neutrónica de una Planta Nuclear del tipo PWR/KWU. Los detectores de neutrones son del tipo SPWR (Self Power Neutron Detector [4, 5] y están dispuestos en columnas. El hecho de disponer de un colectivo de sensores permite utilizar la redundancia para la vigilancia del buen funcionamiento de los mismos.

Sin embargo, las señales están imbuidas en un ruido, que además es creciente con el ciclo de quemado del combustible [3], lo que dificulta la identificación de malfunciones desde el punto de vista del valor medio de la señal.

En este trabajo usaremos la redundancia para detectar anomalías incipientes en los sensores, aunque éstas se produzcan por debajo del nivel del ruido. Aquellos sensores que tengan derivas no deberían formar parte de la Lógica de Seguridad de la Planta.

El trabajo consistirá en normalizar a un valor de referencia todos los sensores bajo vigilancia, y posteriormente comparar un sensor con el valor medio de los restantes.

Se usan técnicas de análisis de desviación típica para identificar si el sensor tiene una deriva.

## 2 DISPOSITIVO DE MEDIDA

Los detectores “in-core” son del tipo “self powered” y por ello no necesitan fuente externa de alimentación. Se basan en la emisión beta de neutrones al absorber neutrones [4, 5].

Los emisores son normalmente de  $V^{52}$  y  $Rh^{103}$ , con un quemado 0.012%/mes para el vanadio y del 0.3% para el rodio. Están calibrados en unidades de potencia lineal, y dispuestos en una columna (lanza) paralelos al eje axial del núcleo. En el extremo de la lanza hay un termopar para medir las fluctuaciones de temperatura (Figura 1).

Estos detectores de neutrones autoalimentados pueden tener derivas debido a diversas causas (p-e- el quemado, degradación por radiación,...) te

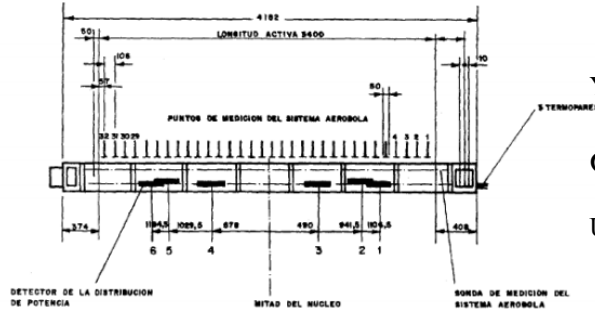


Fig. 1 Disposición de los detectores de neutrones en el núcleo

En la figura 2 aparece la medida del ruido neutrónico, normalizado a potencia 100%, del detector colocado en la parte superior de la lanza. El tiempo de muestreo es de 20 ms; se puede observar fácilmente una apreciable variación de amplitud en la señal. El ruido de alta frecuencia es despreciable.

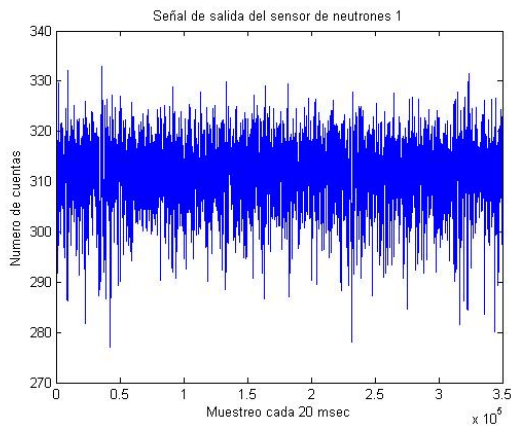


Fig. 2 Señal del detector neutrónico 1

En los valores de la Figura 2 se puede apreciar que la variación presente en la medida es bastante grande (del orden del 6%). Este valor del ruido hace que derivas del funcionamiento del detector del orden del 1 o 2% sean invisibles por un análisis superficial de los datos.

### 3 FUNDAMENTO TEÓRICO

La idea general que subyace en todo el trabajo es, aprovechar la redundancia para comparar la respuesta de un sensor con la media aritmética de los restantes

Tomando las medidas de los seis detectores

$X_1, X_2, X_3, X_4, X_5$  y  $X_6$ . A partir de ahora los nombraremos genéricamente como  $X_i$   $i=1, \dots, 6$ .

Estas medidas tendrán como media

$$\bar{X}_1, \bar{X}_2, \bar{X}_3, \bar{X}_4, \bar{X}_5, \bar{X}_6 \text{ o genéricamente } \bar{X}_i$$

Y poseerán desviaciones estándar

$$\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3, \sigma_4, \sigma_5, \sigma_6 \text{ o genéricamente } \sigma_i$$

Usaremos como referencia la media de las medias

$$X_{REF} = \frac{1}{6} \left( \sum \bar{X}_i \right) \quad (1)$$

Construiremos un vector diferencia referenciando las medidas a esta media de medias

$$X_{mi} = X_i / X_{REF} \quad (2)$$

Con estos datos calcularemos los vectores diferencia

$$d_k(i) = x_k(i) - \frac{1}{5} \sum_{j \neq k} x_j(i) \quad (3)$$

A continuación calcularemos las desviaciones estándar de estos vectores diferencia

$$\sigma_{dk}^2 = \sigma_k^2 + \frac{1}{25} \sum_{j \neq k} \sigma_j^2 \quad (4)$$

Estos valores referenciados tendrán media nula y las desviaciones típicas serán las que nos indicaran la existencia de deriva en las medidas de los sensores y además será posible identificar que sensor es el responsable de la malfunción.

Para efectuar el cálculo tomaremos secciones de la señal de 500 datos y con ellos calcularemos las desviación típicas de los vectores diferencias y podremos ver su evolución temporal y así reconocer las anomalías que se produzcan a lo largo de la marcha de la planta.

En las Figuras 3 y 4 se representan dos secciones de 500 puntos de la señal del detector1 normal y de esa misma señal con una deriva del 1 por ciento.

Como se puede apreciar en las Figuras 3 y 4, esta deriva del 1 por ciento, es indistinguible de la señal normal, dado que el ruido propio de la señal es del orden del 6 por ciento. Por ello es necesario un procedimiento que nos permita detectar estas anomalías, antes de que sean demasiado importantes,

mas en este caso que son señales fundamentales para la seguridad de la planta.

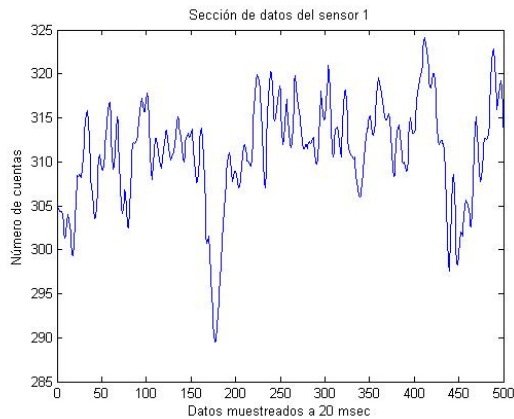


Figura 3: Representación de una sección de los datos originales del detector 1.

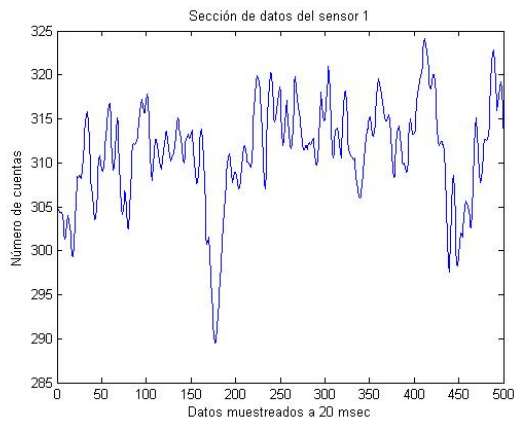


Figura 4: Representación de una sección de los datos con una deriva del 1% del detector 1.

Sin embargo si sometemos los datos al cálculo descrito anteriormente el resultado es que la desviación típica de los datos referenciados a la totalidad de los sensores, nos muestra una variación apreciable y fácilmente medible que nos indicará el malfuncionamiento del detector 1.

#### 4 CÁLCULO DE LA MALFUNCIÓN

Partimos de las señales de los seis detectores tomadas cada 20 ms, durante aproximadamente un cuarto de hora (más de 40.000 datos por detector) y los promediamos a lo largo de todo el intervalo.

En la Figura 5 se representan los datos originales promediados de todos los detectores (valores normales (izquierda) y con una deriva del detector 1 del 1% (derecha)). Esta destacado el detector 1 que es el afectado por la deriva.

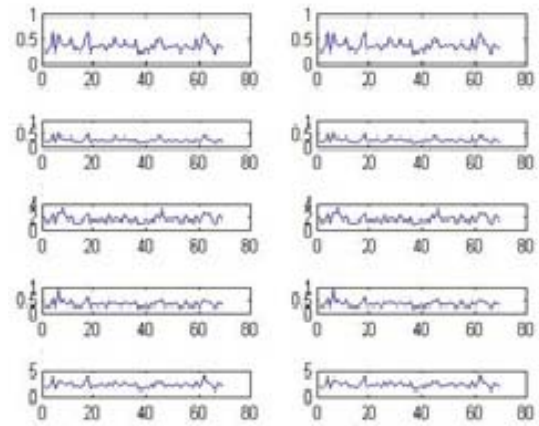


Figura 5: Representación de las desviación típicas de los datos originales promediados de todos los detectores (valores normales (izquierda) y con una deriva del detector 1 del 1% (derecha))

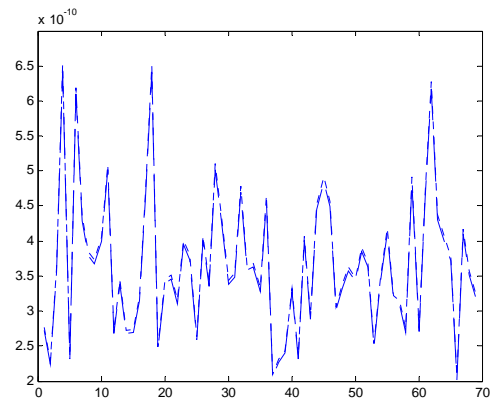


Figura 6: Representación de las desviación típicas de los datos originales promediados del detector 1 (valores normales (puntos) y con la deriva del 1% (trazos)). Es imposible distinguir entre ambas señales.

Si sometemos a las medidas del detector 1 a una deriva del 1 por ciento, calculamos los vectores diferencia y las desviaciones típicas (formulas (3),(4) ), el resultado es que la desviación típica en relación a la normal se ha desviado 0.996.

Efectuados los cálculos para derivas que varían entre más 2 por ciento y menos 10 por ciento se ha encontrado según se aprecia en la Figura7 , que existe una relación aproximadamente lineal.

En este caso es posible hacer una aproximación lineal por mínimos cuadrados, con el resultado

$$\text{Desviación} = 3.1510 \text{ Variación señal} - 2.1501$$

Con esta fórmula podríamos calcular cual es la malfunción del detector en función del valor calculado de la desviación típica-

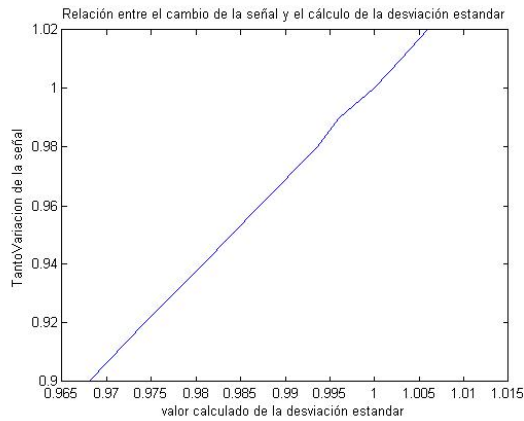


Figura 7: Representación de los valores de la variación de la desviación típica relativa frente a las derivas de los datos originales del detector 1

## 5 CONCLUSIONES

Ante la dificultad de detectar malfunciones de un sensor dentro de un ruido que las oculta, se ha desarrollado un procedimiento que permite su detección.

Para ello usa la existencia de otros sensores que miden el mismo fenómeno- Usando esta redundancia, se crea un vector diferencia de media nula. La desviación típica de este vector diferencia comparado con el valor del sensor sin malfuncionamiento, permite estimar la deriva del sensor.

Se ha simulado la sensibilidad del método, comprobándose su correcta evolución, pudiéndose predecir cual es el valor de la deriva a partir de los cálculos de las desviaciones típicas.

El método es aplicable no solo a este caso de detectores de neutrones, sino a cualquier conjunto de sensores redundantes, por lo que puede ser de gran utilidad en multitud de plantas industriales.

## REFERENCIAS

1. Carrascosa L. et al., “*Implantación del índice de fiabilidad de equipos (ERI) en ANAV*”, 40 Reunión de la Sociedad Nuclear Española, Valencia Octubre 2014
2. Blazquez J., “*Distancia multivariable y aplicación al ruido neutrónico*”, 40 Reunión de la Sociedad Nuclear Española, Valencia Octubre 2014
3. Bermejo J.A. et al., “*Estudio de la dependencia espacial de las oscilaciones de ruido neutrónico causadas por fluctuaciones termohidráulicas a la entrada del núcleo de un reactor PWR*”, 40 Reunión de la Sociedad Nuclear Española, Valencia Octubre 2014
4. Goldstein N.P. et al., “*A survey of self-powered detectors. Present and future*”, IEEE Transactions of Nuclear Science, Vol 26, Pg 916-925, 1979
5. Alex M., Ghodgaonkar M.D., “*Development of a self-powered neutron detector for in-core reactor monitoring*”, Nucl. Instr. & Meth. A, Vol 574, Pf 127-133, 2007-