

Vigilancia y diagnóstico *in situ*: análisis de ruido

C. Montalvo y A. García-Berrocal

El mantenimiento predictivo basado en la vigilancia y el diagnóstico de averías se puede llevar a cabo por medio del análisis de ruido que acompaña a las señales de medida. Inicialmente el análisis de ruido se desarrolló para vigilar las señales de potencia procedentes de detectores de neutrones. Actualmente su aplicación se ha diversificado mucho más. Por ejemplo: vigilancia de sensores de proceso como RTD, termopares y transmisores de presión, estimación de la velocidad del refrigerante, vigilancia de vibraciones de los internos, detección de vibraciones anómalas, etc. En este trabajo se presentan detalladamente algunos ejemplos tomados tanto de la literatura como del trabajo de los propios autores.

Predictive maintenance based on surveillance and breakdowns diagnostics can be achieved through the analysis of the noise hidden in the signals. At the beginning noise analysis was developed to monitor the power signals coming from neutron detectors. Nowadays its applications are very diverse. For instance: process sensors surveillance such as Resistance Temperature detectors, thermocouples and pressure transmitters, internals vibration monitoring, abnormal vibrations detection, etc. In this work some examples from the literature and from the authors experience are presented.

INTRODUCCIÓN

El análisis de ruido consiste en el estudio de las fluctuaciones de las señales procedentes de los sensores. El ruido acompaña a las señales de medida y en determinadas disciplinas es fundamental eliminarlo, como por ejemplo en la acústica y en las telecomunicaciones. No obstante, las técnicas de análisis de ruido utilizadas en las centrales nucleares consisten en lo contrario; se prescinde de la señal y se analiza la fluctuación, el ruido.

Pero entonces, ¿qué es el ruido de una señal? Al registrar una magnitud se tiene un conjunto de valores de la misma a lo largo del tiempo. Las centrales nucleares operan en estado estacionario, de manera que la magnitud que se mida oscilará en torno a un cierto valor medio. Ese valor es lo que se denomina componente de continua o señal y la parte oscilante cuya media es nula, es el ruido.

El análisis de ruido consiste en extraer información de los procesos de la central por medio del estudio de esa fluctuación.

FUNDAMENTOS TEÓRICOS DEL ANÁLISIS DE RUIDO

El estudio del ruido se basa en una serie de hipótesis de partida. Si pensamos que los sistemas de la planta, como por ejemplo los sensores, se pueden asimilar a un sistema dinámico, es decir, como una caja negra que recibe

una serie de *inputs* y genera *outputs*, el ruido que se analiza es el *output* y el ruido de entrada se considera estacionario, lo que se conoce como un ruido blanco gaussiano.

Un ruido blanco gaussiano es aquel que además de una distribución de amplitudes de tipo normal, su espectro de Fourier es constante como el de la luz blanca. Esto último implica que si imaginamos que el ruido es un conjunto de armónicos cada uno con una frecuencia de oscilación, no hay ninguno que sea más importante que otro.

Esto tiene una consecuencia vital para poder realizar análisis de ruido

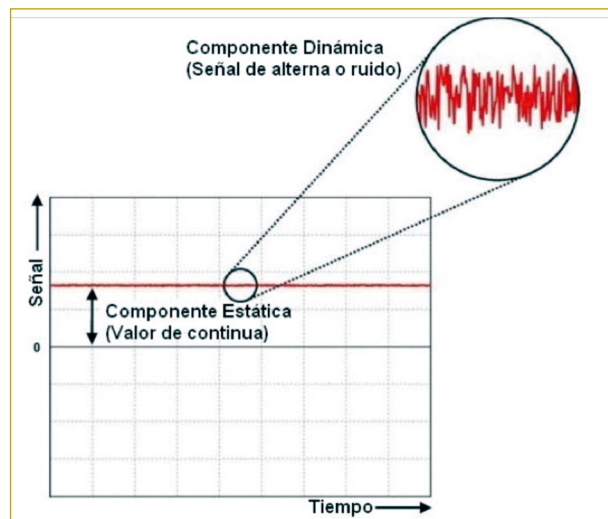


Figura 1: Diferencia entre ruido y señal. Tomado de [1].



CRISTINA MONTALVO MARTÍN es doctor ingeniero de Minas por la UPM. Su tesis doctoral versó sobre el análisis de señales para el mantenimiento predictivo en el contexto de las centrales nucleares. Desde 2012 es profesor ayudante doctor en el área de Ingeniería Mecánica en la UPM y centra su investigación en el análisis de ruido en centrales nucleares, métodos avanzados de procesamiento de señales y en la metrología industrial.



AGUSTÍN GARCÍA-BERROCAL es licenciado en CC. Físicas por la Universidad Autónoma de Madrid y Doctor por la Universidad Politécnica de Madrid (UPM). Desde 2002 es profesor titular de ingeniería mecánica de la ETSI de Minas de la UPM. Dedicó su actividad investigadora al análisis de ruido en centrales nucleares y a los problemas de la medida en el entorno industrial.

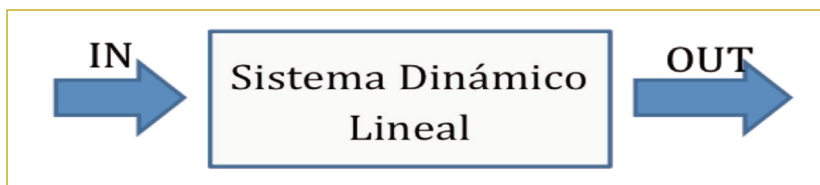


Figura 2.

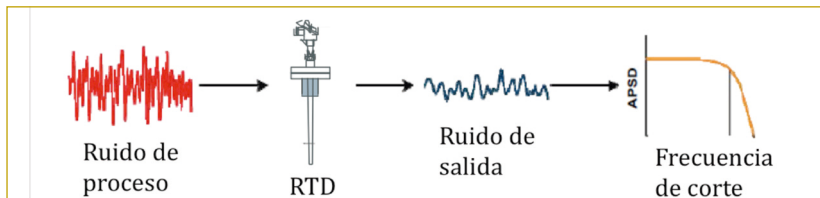


Figura 3: Esquema de análisis de ruido en una Termorresistencia.

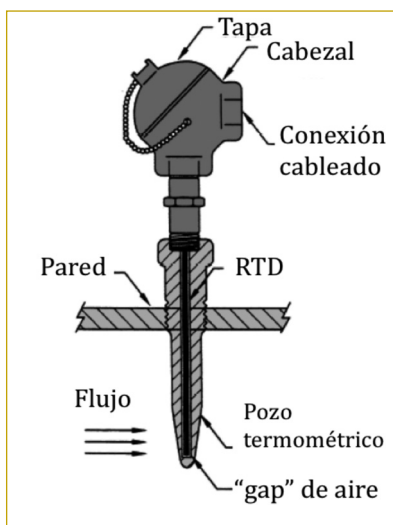


Figura 4. Partes de una termorresistencia.

y es que la salida de los sistemas que son excitados por un ruido blanco, es directamente proporcional a la entrada siendo la constante de proporcionalidad lo que matemáticamente se denomina función de transferencia del sistema. Por tanto, si se tiene el *output*, se conoce el sistema y se puede vigilar su funcionamiento y proceder al diagnóstico de posibles averías.

Veámoslo con un pequeño ejemplo plasmado en la Figura 3. El ruido de proceso (ruido térmico) excita a una termorresistencia que registra una temperatura fluctuante o ruido de salida. Este ruido se observa en el dominio de la frecuencia con un analizador de Fourier. El espectro obtenido que se denomina, densidad espectral de potencia, en inglés *Power Spectral Density* (PSD), nos da información en frecuencia sobre el comportamiento dinámico del sensor.

APLICACIONES VINCULADAS A LA VIGILANCIA DE LOS SENSORES DE TEMPERATURA Y PRESIÓN

Las aplicaciones del análisis de ruido son muy diversas. A continuación se presentan algunas en las que han participado los autores de este artículo y otras tomadas de la literatura.

Como se ha dicho anteriormente los sensores son sistemas dinámicos que filtran el ruido de proceso dando lugar a la señal de salida que posteriormente será analizada. Dependiendo del tipo de sensor, tendremos un sistema dinámico diferente que estará determinado por las propias características del sensor y de su localización en la planta.

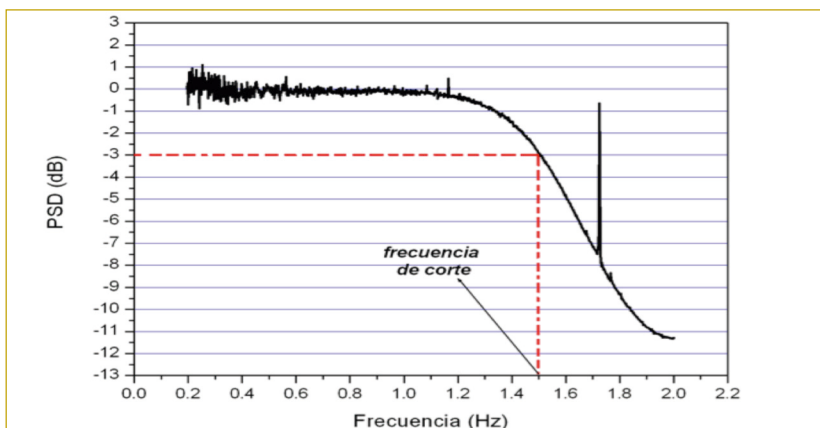


Figura 5: PSD de un termopar de un PWR.

Por ejemplo, un sensor de temperatura que está directamente midiendo en un lazo, está siendo excitado por el flujo del refrigerante que pasa por ese lazo (Ver figura 4). El sistema dinámico a considerar será el del propio sensor y el del pozo termométrico y demás elementos que lo componen.

Los sensores de temperatura se representan matemáticamente mediante un sistema dinámico de primer orden [2]. Estos sistemas se caracterizan fundamentalmente por el tiempo que tardan en responder a un estímulo que se cuantifica por su tiempo de respuesta. En sentido matemático estricto, es el tiempo que tarda el sensor en alcanzar el 63,2 % de la respuesta final al ser excitado por un escalón de temperatura. En el dominio de la frecuencia, el tiempo de respuesta se obtiene por medio de la frecuencia de corte cuando la PSD en dB cae hasta el valor -3 (Figura 5).

Vigilando el tiempo de respuesta se puede monitorizar el estado dinámico del sensor.

Se puede considerar otro caso de sensor como un transmisor de presión de tipo capacitivo que está separado del proceso por medio de una línea sensora (Figura 6). En este caso el sistema dinámico a estudiar debería incluir al sensor en sí mismo y a la línea sensora para reproducir fielmente las condiciones de planta.

En la práctica se comprueba que el espectro del ruido se puede considerar como la superposición de la respuesta dinámica de la línea sensora y la de las membranas del sensor de presión [3,4]. Por tanto la vigilancia se puede enfocar a la pérdida de rigidez de las membranas del sensor, a la detección de burbujas o de bloqueos en la línea, etc.

En la Figura 7 se muestra una línea sensora que se estaba bloqueando y cuya detección se puede llevar a cabo examinando las características de la PSD del transmisor de presión.

ANÁLISIS DE RUIDO NEUTRÓNICO

Cuando se analizan las señales de los detectores de neutrones se pretende conocer el estado dinámico del propio reactor. La fuente del ruido excitador (*driving force*) puede estar en varias causas como las vibraciones mecánicas, el flujo del refrigerante, los cambios de temperatura y sobre todo las burbujas en el caso de los BWR, entre otras. El ruido neutrónico inducido debido al conjunto de estos fenómenos contendrá información de cada uno de ellos en zonas diferentes del espectro. El objetivo del análisis de ruido neutrónico es vigilar la respuesta dinámica del reactor.

En la Figura 9 se identifican las diferentes resonancias del espectro de un

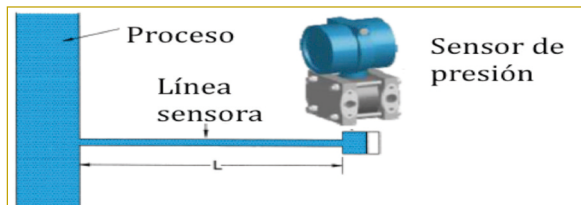


Figura 6. Transmisor de presión acoplado a una línea sensora.

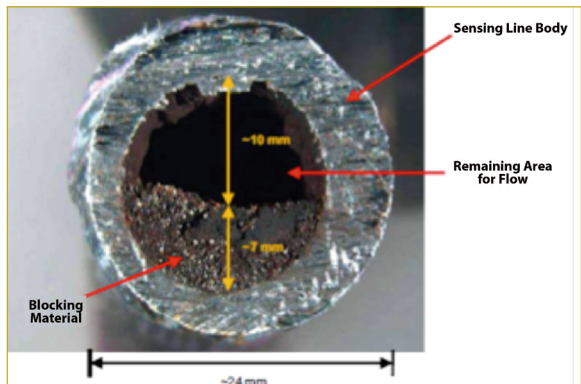


Figura 7. Acumulación de material bloqueante en el interior de una línea sensora. Tomado de [1]

detector de neutrones de un PWR Westinghouse con los diferentes fenómenos que configuran la respuesta dinámica del reactor.

Vigilancia de los internos del reactor

Una de las aplicaciones del ruido neutrónico es la vigilancia de los internos del reactor en los PWR y concretamente la vibración pendular del barrilete para vigilar la integridad de los pernos que lo sujetan a la vasija. Esta vigilancia podría hacerse mediante inspección visual del propio espectro en la frecuencia de interés, que está en torno a los 8 Hz en los PWR Westinghouse. No obstante, a lo largo del ciclo, especialmente al final, la amplitud del ruido neutrónico aumenta y los picos resonantes se solapan entre sí, provocando que no se puedan distinguir con claridad.

Así, se han desarrollado técnicas para ajustar el espectro a una fórmula no lineal que considera la PSD como un conjunto de resonancias [6]. Cada una de ellas está caracterizada por los tres parámetros fundamentales de una vibración; amplitud, amortiguamiento y frecuencia y además un cuarto parámetro que cuantifica el grado de solapamiento entre resonancias.

En la Figura 10 se muestra un ejemplo de este ajuste.

Los parámetros hallados en el ajuste no lineal hacen posible la vigilancia paramétrica de las resonancias de interés.

Estimación de la velocidad del refrigerante

Hasta este momento se han incluido aplicaciones que involucraban el tra-

tamiento de señales univariantes, es decir, una única señal. A veces, es necesario correlacionar unas señales con otras para establecer si un fenómeno es causa de otro o si se transporta y a qué velocidad. Este es el principio que subyace a la hora de estimar la velocidad del refrigerante o de las burbujas.

En el caso siguiente se muestra una perturbación local que viaja desde un detector a otro. El tiempo que tarda en transmitirse esta perturbación también llamado tiempo de tránsito es inversamente proporcional a la velocidad de propagación del fenómeno.

Desde el punto de vista del análisis de señal, el tiempo de tránsito se puede calcular en el dominio del tiempo por medio de la correlación cru-

zada entre ambas señales (Figura 11). También, se puede examinar la fase y la coherencia del espectro cruzado de ambas señales. Lo que se observa es alta coherencia y fase lineal en la frecuencia de interés del fenómeno (Figura 12). La pendiente de la fase es proporcional al tiempo de tránsito.

Estimando la velocidad del refrigerante en diferentes puntos del reactor, siempre que la instrumentación lo permita, se pueden realizar mapas de todo el reactor con las velocidades estimadas [8] (ver Figura 13).

Vigilancia de vibraciones anómalas

Las PSD de los detectores de neutrones ya sean extranucleares o intranucleares,

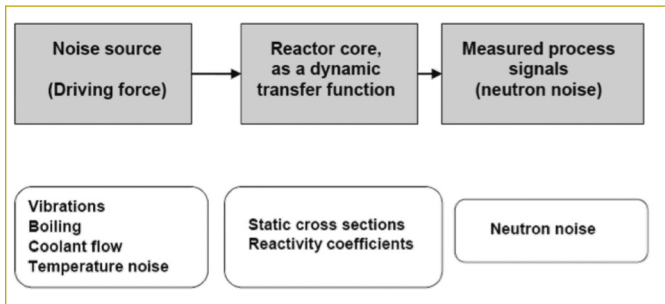


Figura 8: Esquema de Fuentes de ruido en el reactor. Tomado de [5].

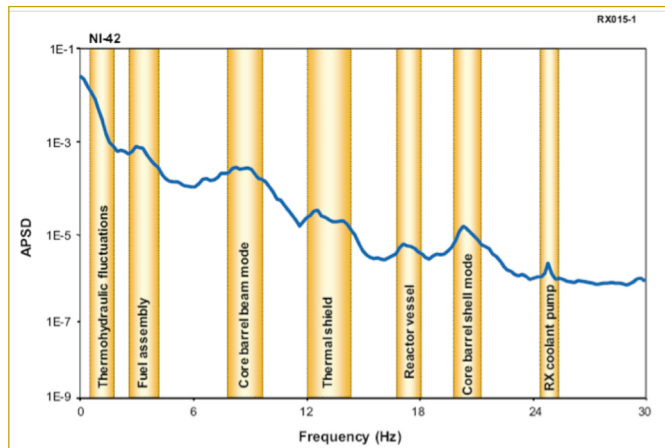


Figura 9: Resonancias en un espectro neutrónico y el fenómeno físico con la que se relaciona. Tomado de [1].

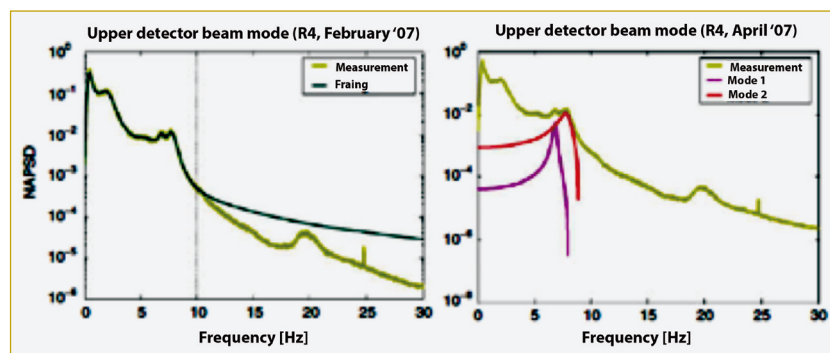


Figura 10: Ajuste no lineal de un espectro neutrónico (izqda.) y representación gráfica de dos resonancias detectadas por medio del ajuste (dcha.). Tomado de [7].

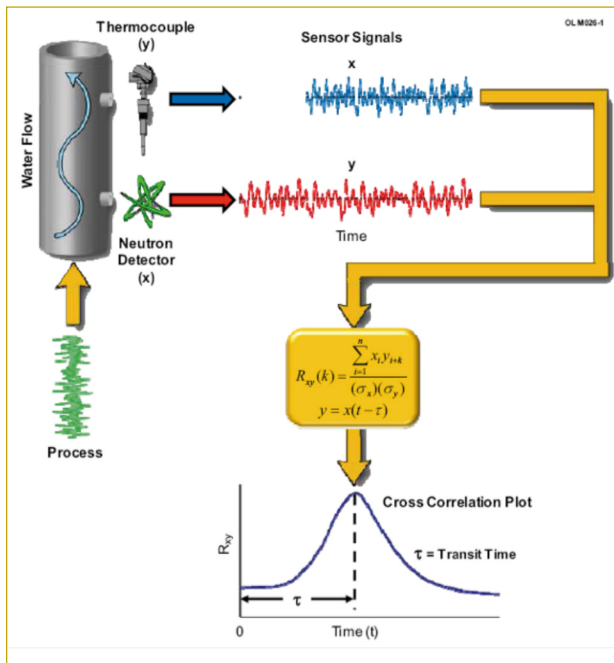


Figura 11. Fundamento teórico para obtener el tiempo de tránsito entre un detector de neutrones y un termopar de salida. Tomado de [1]

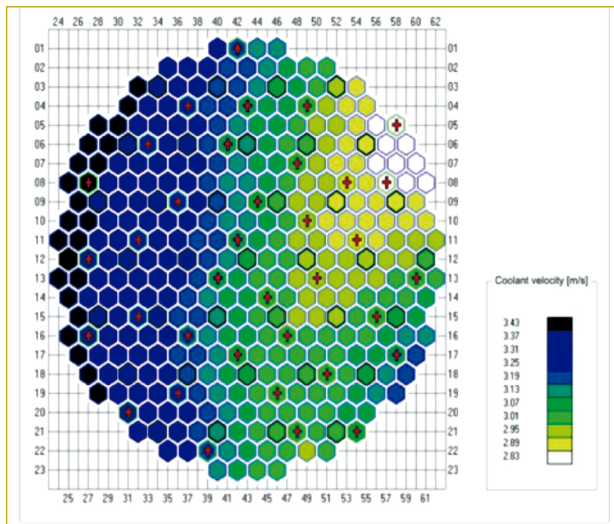


Figura 13: Mapa de velocidades del refrigerante estimadas por análisis de ruido. Tomado de [8].

muestran el estado dinámico del reactor. Las vibraciones anómalas pueden detectarse mediante pattern recognition, es decir, reconociendo si el perfil de la PSD cambia o no.

En la Figura 14 se muestra la detección de una vibración anómala debido a una barra de control. El análisis es muy simple. Primero se observa un pico resonante en la PSD que anteriormente no se veía. A continuación, para poder detectar qué barra de control está dando lugar a la vibración, se mide la amplitud del pico resonante en las PSD de los diferentes detectores del núcleo. El mapa de amplitudes permite cercar la barra de control problemática [8].

Otro parámetro global de interés es el Coeficiente de Temperatura del Moderador (CTM) del que han ido surgiendo diferentes estimadores que utilizan el espectro de un detector de neutrones y el espectro cruzado entre señales neutrónicas y de temperatura.

CONCLUSIONES

Las aplicaciones del análisis de ruido son muy amplias, tanto para la vigilancia de sensores como para la monitorización de diferentes fenómenos que tienen lugar en el reactor.

La ventaja que tiene es que son técnicas pasivas de bajo coste que no intervienen en la operación de la planta

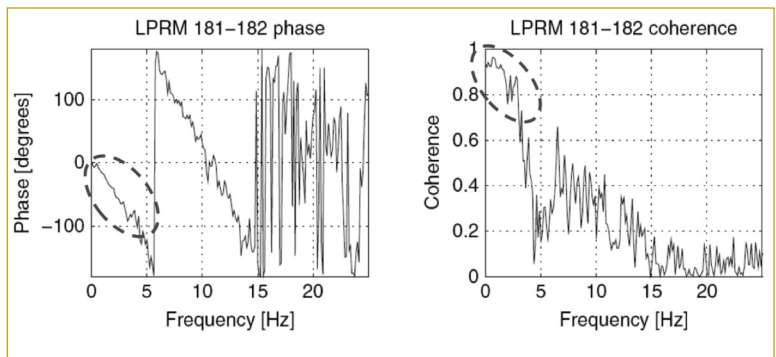


Figura 12. Coherencia y fase de un espectro cruzado de dos detectores LPRM.

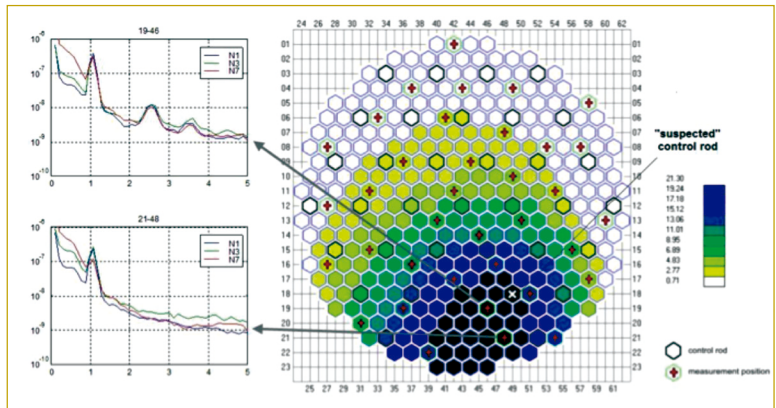


Figura 14: Detección de una vibración anómala de una barra de control. Tomado de [8].

Otras aplicaciones: determinación de parámetros dinámicos globales

También se pueden utilizar las técnicas de análisis de ruido junto con modelos de series temporales tipo AR o ARMA para estimar la *Decay Ratio* y vigilar la estabilidad en un BWR. Esta aplicación tiene como punto de partida las señales neutrónicas y su análisis tanto en el dominio del tiempo como en la frecuencia.

y estiman *in situ* determinados parámetros que se pueden vigilar para realizar un mantenimiento predictivo.

REFERENCIAS

- [1] HM Hashemian, On-Line Monitoring Applications in NPP. Tesis doctoral (2009).
- [2] C Montalvo, A García-Berrocal, JA Bermejo, C Queral. Advanced surveillance of Resistance Temperature Detectors in Nuclear Power Plants, Ann. Nucl. Energy. 65 (2014) 35-40.
- [3] M Balbas, C Montalvo, A García-Berrocal, J Blázquez. In situ surveillance of capacitive pressure transmitters dynamic poles, Nucl Technol. 178 (2012) 318-323.
- [4] J Ballestrin, J Blázquez, D Cillero, R Sansa, O Vela, Proyecto VISSP: Vigilancia *in situ* de sensores de presión, ITN/TS-22/IF-95 (1996).
- [5] On-line monitoring for improving performance of nuclear power plants part 2: process and components condition monitoring and diagnostics, IAEA NUCLEAR ENERGY SERIES NO. NP-T-1.2 (2008).
- [6] A García-Berrocal, J Blázquez, C Montalvo, M Balbas. Resolving mechanical resonances with breit-wigner formula, J. Vibrat. Control. 15 (2009) 1267-1280.
- [7] I Pázsit, C Demazière, Noise Techniques in Nuclear Systems. in: Gacuci DG (Ed.), Handbook of Nuclear Engineering. 2010.
- [8] T Czibók, G Kiss, S Kiss, K Krinisz, J Végh. Regular neutron noise diagnostics measurements at the Hungarian Paks NPP, Prog. Nuclear Energy. 43 (2003) 67-74. ■