Análisis de la fenomenología del ruido neutrónico en un reactor nuclear. Estudio de los armónicos en señales de potencia mediante los códigos acoplados TRACE y PARCSv3.2.

Elena Redondo, Nicolás Olmo-Juan, Teresa M. Barrachina, Rafael Miró, Gumersindo J. Verdú
Instituto Universitario de Seguridad Industrial, Radiofísica y Medioambiental (ISIRYM)
Universitat Politècnica de València
Camí de Vera s/n, 46022, Valencia, Spain
elreva@etsii.upv.es, nioljua@ign.upv.es, tbarrachina@ign.upv.es, rmiro@ign.upv.es, gverdu@ign.upv.es

Marina Garcia-Fenoll, Jose María Posada
Centrales Nucleares Almaraz-Trillo (CNAT)
Av. Manoteras 46-bis, 28050, Madrid, Spain
mgfn.iberinco@cnat.es, jmpb@cnat.es

Resumen *– El objetivo del presente trabajo ha sido la mejora en la comprensión sobre la fenomenología del ruido neutrónico presente en reactores de agua ligera. Que en el caso de los diseños KWU, además de desconocerse su origen, puede provocar oscilaciones en el flujo neutrónico capaces de alterar la operación normal de la planta.*

Con este fin, se han separado señales reales de potencia de un reactor nuclear en los distintos armónicos que las componen. Posteriormente, se han realizado transitorios debidos a la introducción de fluctuaciones en la densidad del moderador y la temperatura del combustible, con la forma de los armónicos obtenidos anteriormente, para un amplio rango de amplitudes. De forma que, se ha podido observar cual es la contribución de cada uno de los modos analizados al comportamiento de la potencia total.

Se pretende analizar la influencia que tiene la excitación de diversos modos en el interior del reactor debido a fluctuaciones generadas en el mismo, así como su influencia en el ruido registrado. También se desea estudiar la aptitud del código acoplado TRACE y PARCS para la modelización de la transmisión del ruido neutrónico en el interior de la vasija, mediante la simulación de perturbaciones confinadas a un único elemento combustible.

1. INTRODUCCIÓN.

El ruido neutrónico de baja frecuencia se puede definir como fluctuaciones en el flujo neutrónico con una frecuencia de hasta 4 Hz. Si la población neutrónica es baja, la aparición de estas perturbaciones puede deberse a los neutrones individuales, sin embargo, cuando hablamos de una población neutrónica alta, como es el caso de un reactor nuclear., este fenómeno puede poseer diversas causas, tales como turbulencias en distintos parámetros termohidráulicos del refrigerante, como pueden ser la densidad o el caudal; vibraciones mecánicas de los componentes, procesos de estratificación de temperatura, etc.

Por ello, su presencia en los reactores de tipo PWR puede ser señal de una desviación respecto al normal funcionamiento de algún componente de la central que está ocasionando la aparición de perturbaciones, que reciben el nombre de fuente de ruido neutrónico. La importancia y repercusión

del ruido neutrónico se amplifica en los reactores de diseño alemán KWU-PWR, entre los que se encuentra la central objeto de este estudio. La monitorización del efecto de estas fluctuaciones en el flujo neutrónico permite la posibilidad de realizar una detección de anomalías temprana y, además, si se aplicasen adecuadas técnicas de descomposición, la caracterización de éstas.

2. ANÁLISIS MODAL.

El análisis modal se basa en el hecho de que la respuesta a la vibración de un sistema dinámico lineal invariante con el tiempo puede expresarse como la combinación lineal de un conjunto de movimientos armónicos simples denominados modos naturales de oscilación.

En tecnología nuclear, el análisis modal se aplica en el estudio del flujo neutrónico, esto es, en la resolución de la ecuación de la difusión. Una de las teorías que aborda este tema es el análisis de los Modos Lambda, en la cual, se fuerza la criticidad del reactor dividiendo los términos de producción neutrónica, de la ecuación de la difusión, por un número positivo e igualándolo a los términos que representan las pérdidas de neutrones, en la ecuación de la difusión.

$$L\phi_n = \frac{1}{\lambda_n} M\phi_n$$

$$L = \begin{bmatrix} -\nabla\cdot(D_1\vec{\nabla}) + \Sigma_{a1} + \Sigma_{12} & 0 \\ -\Sigma_{12} & -\nabla\cdot(D_2\vec{\nabla}) + \Sigma_{a2} \end{bmatrix}$$

$$M = \begin{bmatrix} \nu\Sigma_{f1} & \nu\Sigma_{f2} \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$$

Existen diversos valores positivos λ_n, que reciben el nombre de autovalores, que satisfacen la ecuación anterior. La función del flujo obtenida para cada uno de estos autovalores se denomina autovector y constituye una solución del flujo de la ecuación de la difusión. A estas soluciones se les denomina armónicos o modos. El mayor de los valores de λ_n se corresponde con el modo fundamental, que es el armónico de mayor influencia. El resto de los armónicos se ordenan por orden de mayor a menor importancia.

Por otro lado, para facilitar la resolución de la ecuación de la difusión, cada armónico se puede separar en su componente temporal y su correspondiente componente espacial.

$$\phi(\vec{r},t) \approx \sum_{n=1}^{N_m} a_n(t)\phi_n(\vec{r})$$

Siendo N_m el número de armónicos considerados o autovalores λ_n, a_n(t) la componente temporal de cada modo, que está relacionada con la amplitud, y finalmente, Φ_n la componente espacial, relacionada con la forma de cada solución del flujo.

3. MODELO NEUTRÓNICO Y TERMOHIDRÁULICO

Con el objetivo de obtener unos resultados óptimos de las simulaciones realizadas, se ha hecho uso del código termohidráulico TRACE acoplado con el código neutrónico PARCS, de forma que, en cada paso de tiempo, las variables termohidráulicas son proporcionadas por el código termohidráulico al código neutrónico para el cálculo de la potencia, y viceversa.

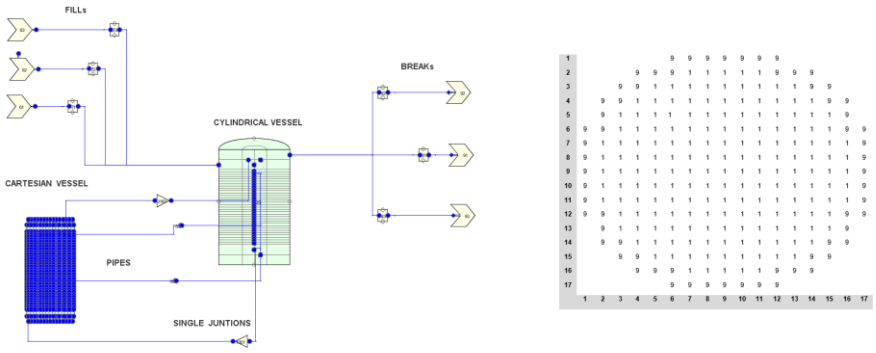

Figura 1. Modelo termohidráulico (izquierda), distribución radial de los nodos en el modelo neutrónico (derecha).

3.1. Modelo empleado en el código termohidráulico

Se ha empleado un modelo de una vasija en 3D, con unos componentes hidráulicos que determinan las condiciones de entrada (*FILLs*) y salida (*BREAKs*) del refrigerante en la vasija. A continuación, se detalla los elementos que lo forman:

- Vasija cartesiana: representa la parte del reactor donde se encuentran los elementos combustibles. Esta dividida en 225 canales, formando una malla radial cuadrada, donde las celdas situadas en las cuatro esquinas tienen volumen cero. Por lo que, hay 177 canales activos, correspondientes a los 177 elementos combustibles, que a su vez están divididos en 34 niveles axiales; 32 de la zona activa y 2 correspondientes al reflector.

- Vasija cilíndrica: radialmente esta dividida en dos nodos, el interior, que representa el *Bypass*, y el exterior, que modela el *Downcomer*. Ambos nodos están divididos en tres secciones azimutales θ, correspondientes a los tres lazos del circuito primario.

  Axialmente, cuenta con dos niveles más que la vasija cartesiana, a través de los cuales, se representa el *Upper Plenum* y el *Lower Plenum*, pues no hay ningún componente hidráulico para modelar estas partes de la vasija.

  La unión entre ambas vasijas se realiza a través de 2040 componentes PIPE, que conectan todos los niveles radiales de los canales exteriores de la vasija cartesiana con los niveles radiales correspondientes del anillo interior de la vasija cilíndrica, además, 354 SINGLE JUNCTION's conectan cada uno de los nodos de los niveles axiales, superiores e inferiores, de la vasija cartesiana con el *Bypass*, de la vasija cilíndrica.

- Condiciones de contorno: Para la modelización de las condiciones de contorno a la entrada y a la salida de la vasija cilíndrica se ha hecho uso de 3 componentes FILL y, otros tantos, BREAK, respectivamente; y que se corresponden con cada una de las secciones azimutales θ de la vasija cilíndrica.

- Estructuras de calor: cada uno de los 177 canales activos de la vasija cartesiana está vinculada con una estructura de calor HTSTR. A su vez, cada una de las 3 secciones azimutales θ del *Bypass* también llevan asociada una estructura de calor. Todas ellas están vinculadas al componente POWER.

  Por último, el calor transferido del interior del barrilete al exterior de éste se representa con 3 *HTSTR*, pero en este caso no están asociadas al componente *POWER*.

3.1. Modelo empleado en el código neutrónico

El modelo neutrónico consta de un núcleo dividido en 34 niveles axiales, de los cuales, 32 corresponden a la zona activa y 2 al reflector (en la parte superior e inferior del reactor). Radialmente, está dividido en un mapa de 17 x 17 celdas, donde las interiores se corresponden con el combustible y el anillo exterior con el reflector. Las dimensiones de las celdas son las mismas que las de los nodos de la vasija cartesiana.

Para las secciones eficaces, este modelo considera 1411 composiciones isotrópicas diferentes de acuerdo con el diseño de los elementos combustibles y el quemado; 1408 corresponden al núcleo activo y 3 a los reflectores (inferior, superior y radial)

En la figura 1 (derecha) se muestra la posición radial de los nodos del modelo neutrónico. Las celdas con el número 1 representan los nodos activos, mientras que, las celdas con el número 9 representan los nodos que se corresponden con el reflector.

3.3. Detectores INCORE

Los detectores INCORE, o PDDs, permiten conocer la densidad local de potencia en el núcleo a partir de las medidas de flujo neutrónico. Para conocer la potencia local que medirían dichos detectores, se toman los valores de la potencia lineal calculados por el código neutrónico en la posición radial y axial donde se ubican.

La central objeto de este análisis, posee 36 PDDs distribuidos en 6 planos axiales, conteniendo cada uno de ellos 6 unidades. En la figura 2 se muestran los nodos del modelo de PARCS correspondientes a la posición radial donde están dichos detectores.

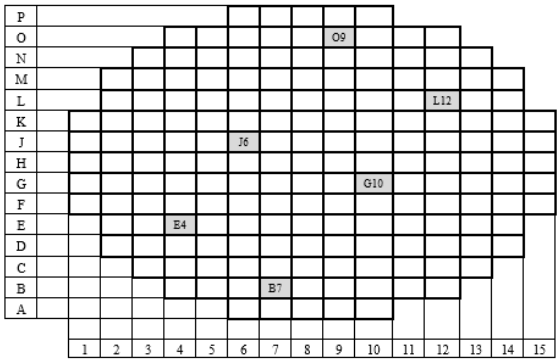

Figura 2. Posición de las lanzas de detectores PDD en el núcleo.

3.4. Detectores EXCORE

Los detectores EXCORE se emplean para adquirir el flujo neutrónico existente en el exterior de la vasija del reactor. La central estudiada posee ocho detectores, repartidos en cuatro posiciones radiales y una única altura axial, que detecta la población neutrónica por encima y por debajo de ésta. La respuesta de cada uno de ellos se obtiene a partir de un promedio de pesos radiales y axiales de la potencia lineal, de los nodos más cercanos, proporcionada a PARCS según información proporcionada por planta.

4. TRANSITORIOS REALIZADOS

El objetivo de este trabajo es reproducir el transitorio de fluctuación del flujo neutrónico registrado en planta mediante la combinación ponderada de sus tres modos principales (fundamental

y primer y segundo armónicos). El resto de los armónicos no se incluyen en el análisis, ya que, su aportación a la solución global se considera insignificante.

En primer lugar, se han descompuesto las señales reales procedentes de los PDDs de la central, objeto de estudio, haciendo uso de la metodología *Signal Component Analysis* para conocer la evolución temporal de la amplitud del flujo neutrónico correspondiente a los tres armónicos que se han considerado.

4.1. Signal Component Analysis o Principal Component Analysis (PCA)

Este procedimiento consiste en la descomposición de la señal a través de la búsqueda de los valores singulares, que se definen como el cuadrado de los autovalores. Para ello se construye una matriz donde cada una de las columnas recogen los valores de un PDD. De forma que hay tantas columnas como PDDs, en este caso 36.

$$X = \begin{pmatrix} PDD_1(T) & PDD_2(T) & \dots & PDD_p(T) \\ PDD_1(2T) & PDD_2(2T) & \dots & PDD_p(2T) \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ PDD_1(N_tT) & PDD_2(N_tT) & \dots & PDD_p(N_tT) \end{pmatrix}$$

Seguidamente, se aplica a esta matriz la SVD (*Singular Value Decomposition*), una descomposición matricial, mediante la que se obtienen tres matrices: U, de dimensiones N_tT x r; Σ, matriz diagonal de dimensiones r x r y V con un tamaño de p x r. Las columnas de U se conocen como los vectores singulares izquierdos de X, mientras que las columnas de V se conocen como sus vectores singulares derechos, siendo el número de columnas de ambas matrices igual al número de armónicos calculados. Los valores de la diagonal de Σ, δ_r, son los valores singulares, de forma que $\delta_1 \geq \delta_2 \geq \dots \geq \delta_3 \geq 0$. Las tres matrices calculadas cumplen la siguiente relación.

$$X = U\Sigma V^T = \sum_{j=1}^{p} u_j \sigma_j \nu_j^T$$

X se puede entender también como el sumatorio del producto del vector singular izquierdo, el valor singular y el vector singular derecho transpuesto de cada uno de los modos o armónicos.

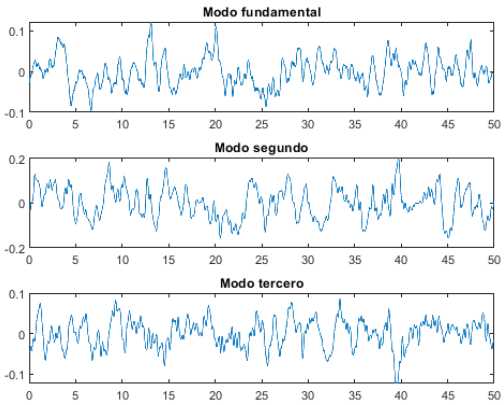

Figura 3. Evolución temporal del modo fundamental, del modo segundo y del modo tercero obtenidas con las Signal Value Decomposition.

4.2. Reproducción de ruido registrado

Para conocer el peso que tiene en la potencia total cada uno de los modos, es necesario reproducir el ruido registrado en las señales de los PDDs reales a través de la simulación de transitorios con los códigos neutrónico y termohidráulico acoplados: PARCS y TRACE. Para ellos, se ha utilizado algunas ordenes referidas al ruido neutrónico en la tarjeta TRANS de PARCS.

```
EXCI_MOD      5         0
whit_noi     10.0  45.0  0.05     50.0     0.01
          exsta   exctend   wnfmin  wnfmax   wnfstp
DM_AMPLM   0.0 0.0 1.0 0.0 0.0
TF_AMPLM   0.0 0.0 0.0 0.0 0.0
HARMON_F   'modos_pow.har'
```

Figura 4. Órdenes del input de PARCS acerca del ruido neutrónico.

Como se muestra en la figura 4, se puede simular ruido tanto en la densidad del moderador, DM_ AMPLM, como en la temperatura del combustible, TF_AMPLM. En ambas órdenes los dos primeros números determinan características del ruido blanco, mientras que, los tres siguientes están vinculados con la amplitud del modo fundamental, el primer armónico y el segundo armónico, respectivamente.

El hecho de que se introduzca el ruido en las variables de la temperatura del combustible y la densidad del moderador en el código neutrónico, PARCS, no quiere decir que sea éste el que las calcula, sino que modifica los valores ya obtenidos por el código termohidráulico, TRACE.

Para la introducción de ruido en las simulaciones, es necesario un fichero que contenga la forma temporal y otro que contenga la forma espacial de cada uno de los armónicos a analizar. El primero se denomina *amplt*, y se corresponde con la amplitud obtenida en la *Signal Component Analysis*, el segundo se llama *modos-pow.har*. Ambos están en forma de fichero externo, y se les llama desde código neutrónico.

RESULTADOS

A continuación, se exponen los resultados obtenidos en la simulación de los transitorios, detallados en el apartado anterior.

5.1. Excitación de armónicos puros: Ruido en la densidad del moderador y Ruido en la temperatura del moderador

En primer lugar, se ha querido analizar el comportamiento por separado del modo fundamental, el primer armónico y el segundo armónico del flujo. Para ello, se han realizado simulaciones de transitorios en los que se ha excitado únicamente un armónico. Posteriormente, se ha comparado la señal obtenida de la simulación con la señal real, de manera que, se pueda ver cómo influye cada uno de los armónicos por separado a la solución total. En las figuras 5 y 6, se muestra dicha comparación en el PDD L12. En el resto de los detectores se observan resultados similares.

Se ha de tener en cuenta que hay picos en la señal real que no aparecen en las simulaciones. Esto es debido a que hay un gran número de modos, por lo que dichos picos se pueden corresponder a aquellos armónicos que no se han incluido en el análisis. En la figura 5, se muestran las gráficas correspondientes al ruido procedente de la densidad del moderador y en la figura 6, al procedente de la temperatura del combustible.

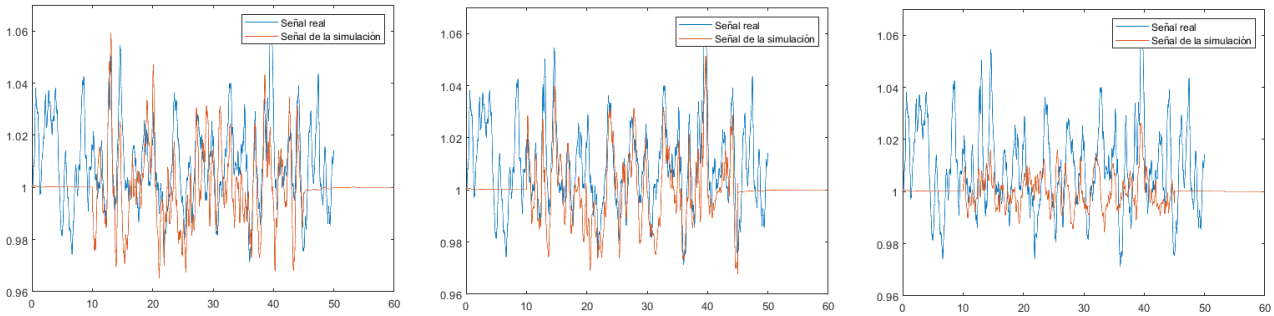

Figura 5. Señal simulada modo fundamental (izquierda), modo segundo (centro) y modo tercero (derecha) producida por ruido en la densidad del moderador vs señal real.

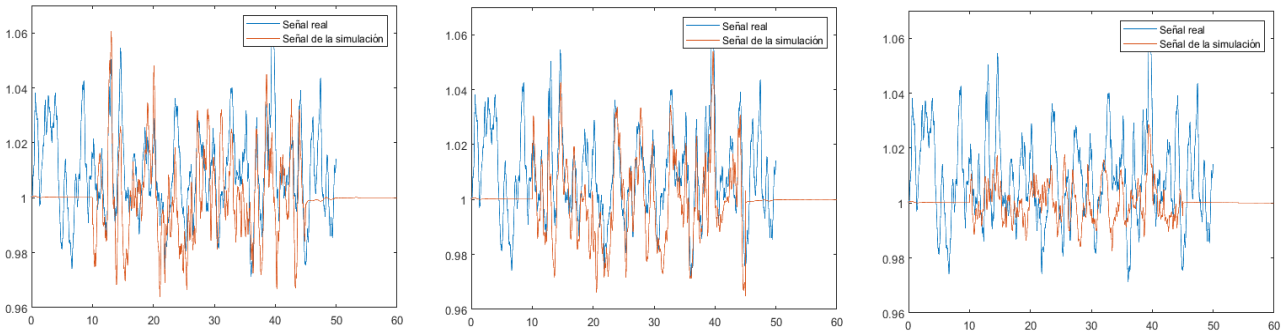

Figura 6. Señal simulada modo fundamental (izquierda), modo segundo (centro) y modo tercero (derecha) producida por ruido en la temperatura del combustible vs señal real.

Como se puede observar, en ambos casos, el modo fundamental y el modo segundo se ajustan bastante bien. La explicación de que el tercero no se ajuste adecuadamente se encuentra en el hecho de que tiene menos importancia que los dos anteriores.

5.2. Combinación de armónicos: Ruido en densidad del moderador.

Una vez que se conoce la aportación individual del modo fundamental y de los dos primeros armónicos, se han lanzado transitorios en los que se han combinado los tres modos principales del ruido ocasionado por la densidad del moderador, para intentar obtener unas señales de las simulaciones que se asimilen a la señal real. A continuación, se muestran los resultados obtenidos en 3 PDDs, en los niveles axiales superior e inferior de cada uno de ellos.

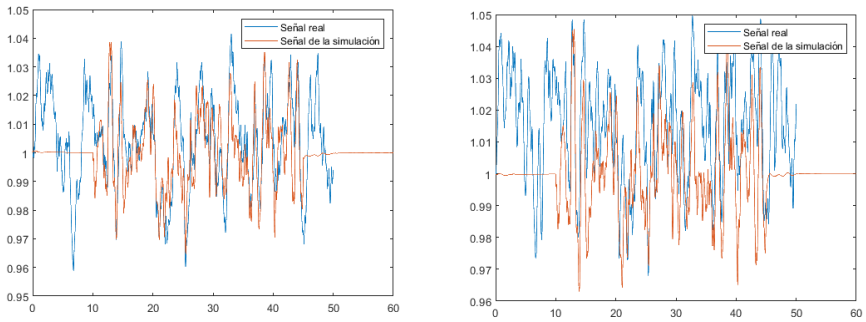

Figura 7. PDD G10, en parte superior (izquierda) e inferior (derecha) del núcleo, simulado vs señal real.

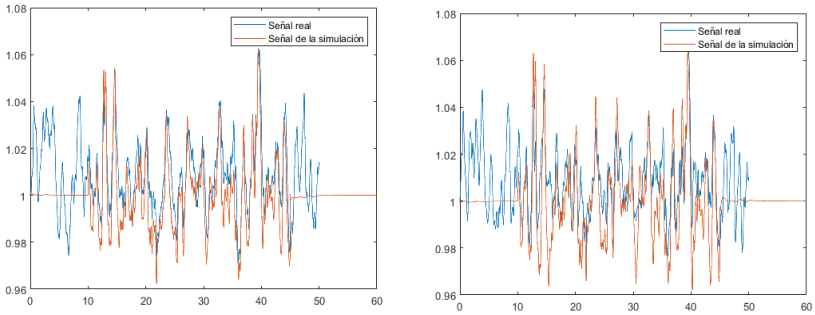

Figura 8. PDD L12, en parte superior (izquierda) e inferior (derecha) del núcleo, simulado vs señal real.

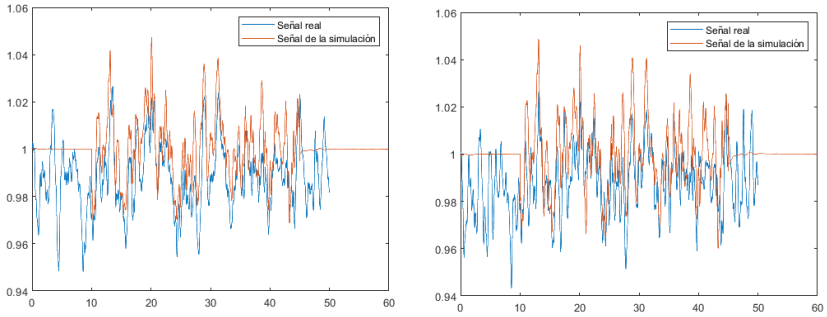

Figura 9. PDD J06, en parte superior (izquierda) e inferior (derecha) del núcleo, simulado vs señal real.

En las figuras 7, 8 y 9 se aprecia que una vez que se combinan los tres modos se obtiene una señal simulada bastante similar a la señal real.

CONCLUSIONES

Para reproducir las señales reales de los PDDs, primero era necesario conocer la forma que tiene cada armónico del flujo neutrónico y su amplitud en función del tiempo, lo cual se ha conseguido satisfactoriamente mediante la obtención de los tres modos principales y la descomposición de las señales procedentes de los detectores pertenecientes a la central objeto de estudio, con el empleo de la metodología SVD (*Singular Value Decomposition*).

Seguidamente, haciendo uso de los códigos PARCS y TRACE, acoplados, se ha reproducido el comportamiento del reactor introduciendo mediante la combinación del modo fundamental y sus dos primero armónicos, dándole distintos pesos a cada uno, hasta obtener unas señales de los PDDs que reproducen con bastante exactitud las señales de los PDDs reales, tanto su amplitud como la gran mayoría de picos que aparecen en ellas, existiendo una minoría de éstos que no se han podido simular, debido a que parecen pertenecer a modos menores no contemplados inicialmente.

REFERENCIAS

C.Mesado, R.Miro, T.Barrachina, G.Verdú (2016). Model 3D Cores for PWR Using Vessel components in TRACEv50P3. U.S.Nuclear Regulatory Commission.

D.Ginesta, R.Miro, G.Verdú, T.Barrachina (2011). Modal processing of the Local Range Monitors singals in BWR NPP. In: Annals of Nuclear Energy 38, pag. 2441.

G.Verdú, D.Ginesta (2014). Modal decomposition method for BWR stability analysis using Alpha-modes. In: Annals of Nuclear Energy 67, pag. 31.

T.Downar, Y.Xu, V.Seker (2018). Overview of the CORTEX project. In: Proc.Int. Conf.Physics OF Reactor – Reactor Physics Paving the Way towards More Efficient Systems. PHYSOR2018