

DESARROLLO DE UNA METODOLOGÍA DE ANÁLISIS DE INESTABILIDADES EN REACTORES BWR.

M. Garcia-Fenoll, A. Abarca, T. Barrachina, R. Miró, G. Verdú

Instituto de Seguridad Industrial, Radiofísica y Medioambiental (ISIRYM), Universitat Politècnica de Valencia (UPV).

mfenoll@isirymp.upv.es, aabarca@isirymp.upv.es, tbarrachina@iqn.upv.es, rmiro@iqn.upv.es, gverdu@iqn.upv.es

SINOPSIS

En este trabajo se presenta una metodología de análisis de inestabilidades en reactores del tipo BWR. Esta metodología abarca técnicas de análisis modal del punto de operación, técnicas de análisis de señal y simulación de transitorios mediante el código 3D acoplado RELAP5/PARCSv2.7. Las secciones macroscópicas se obtienen mediante la metodología SIMTAB, a partir de los datos de CASMO-4/SIMULATE-3. Los ficheros de entrada para los códigos neutrónico y termohidráulico se generan automáticamente, y se utiliza un mapa neutrónico-termohidráulico basado en el análisis de los modos lambda del núcleo a partir del código VALKIN (desarrollado en la UPV), con el fin de no condicionar el patrón de oscilación.

Se ha añadido al código acoplado la capacidad de introducir perturbaciones en la densidad, tanto para el núcleo completo como para determinados niveles axiales, con el fin de provocar oscilaciones en la potencia total. El patrón espacial de estas perturbaciones de densidad responde a la forma de los modos lambda obtenidos mediante el código VALKIN (fundamental y primer y segundo armónico). Estas perturbaciones de densidad se introducen en el código PARCSv2.7, en la selección de las secciones eficaces, a partir de las densidades proporcionadas por RELAP5.

El caso de estudio es el evento de inestabilidad en la central nuclear Ringhals I, recogido en 'Ringhals I Stability Benchmark' de la NEA. Se analiza el punto de operación 9. Se han aplicado una serie de perturbaciones distintas en el primer nivel axial activo y se ha analizado la respuesta de los detectores LPRM del núcleo. La metodología desarrollada permite reproducir el comportamiento inestable del punto de operación conocido.

1. INTRODUCCIÓN

Uno de los métodos para llevar a cabo el análisis de inestabilidades es la aplicación de técnicas de análisis de señal a los datos de LPRMs de reactores BWR [1]. Otra técnica desarrollada con el fin de analizar oscilaciones de potencia es el análisis modal [2]. El uso de códigos acoplados *best estimate* para afrontar el estudio de inestabilidades es también una de las áreas de interés en el campo nuclear [3].

Reproducir eventos con oscilación de potencia con códigos acoplados no es sencillo. Es de sobra conocido que la difusión numérica de los códigos nucleares es un aspecto a tener en cuenta, y ha de minimizarse en la medida de lo posible [4].

En este trabajo, se presenta una metodología para el análisis completo de eventos de inestabilidad. La metodología comprende técnicas de análisis modal, técnicas de análisis de señales y la simulación con el código acoplado RELAP5 [5]/PARCSv2.7 [6].

2. METODOLOGÍA

Se ha desarrollado una metodología para el análisis de inestabilidades regionales. El primer paso consiste en la aplicación de la metodología SIMTAB [7] para obtener las secciones macroscópicas necesarias. Se proporcionan como datos de partida datos de CASMO4 [8]/SIMULATE3 [9]. Se utiliza la función *audit* para obtener los datos de la librería CASMO4. Las secciones eficaces proporcionadas se definen en función de la temperatura del combustible y de la densidad del moderador, y se escriben en dos ficheros llamados *nemtab* y *nemtabr*.

El mejor esquema de acoplamiento entre los nodos termohidráulicos y neutrónicos es aquel que tiene el mismo número de nodos que elementos combustibles existen en el núcleo del reactor. Dado que RELAP5 no admite un gran número de componentes, es necesario agrupar los elementos combustibles en un cierto número de componentes termohidráulicos. Esta asociación se realiza en función de los modos Lambda, con el fin de no distorsionar el fenómeno de acoplamiento entre la termohidráulica y la neutrónica que se da durante las inestabilidades. Los modos Lambda se obtienen con el código VALKIN [10].

VALKIN es un código neutrónico 3D, desarrollado por la Universidad Politécnica de Valencia (UPV), capaz de integrar la ecuación de la difusión neutrónica en función del tiempo en el núcleo del reactor en la aproximación de dos grupos de energía, mediante un método nodal modal. El código se alimenta de las secciones eficaces para cada nodo, así como de los datos geométricos del núcleo y ciertos parámetros numéricos. Con este código es posible obtener también la evolución en el tiempo del flujo neutrónico y sus armónicos (modos) durante un transitorio.

Los valores nodales de las secciones eficaces para VALKIN han de escribirse en un fichero binario, que es generado automáticamente. Primero se ejecuta PARCSv2.7 para obtener las secciones eficaces correspondientes al estado estacionario. Las condiciones de contorno termohidráulicas utilizadas se toman del fichero *summary file* de SIMULATE3. PARCS escribe las secciones eficaces en un fichero que es rescrito en binario aplicando el código desarrollado en la UPV *Reord_Xsecs_Parcs*.

Los modos Lambda calculados (fundamental y primer y segundo armónico) para el punto de operación 9 del benchmark de la central nuclear Ringhals I se muestran en las figuras 1 a 3.

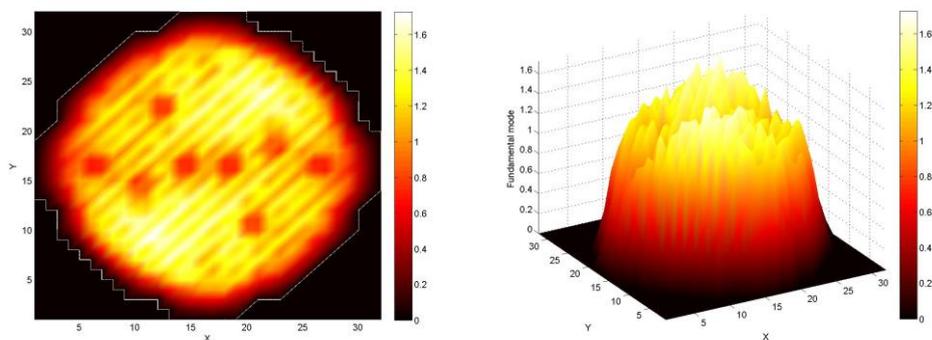


Figura 1. Representación planar y 3D del modo fundamental.

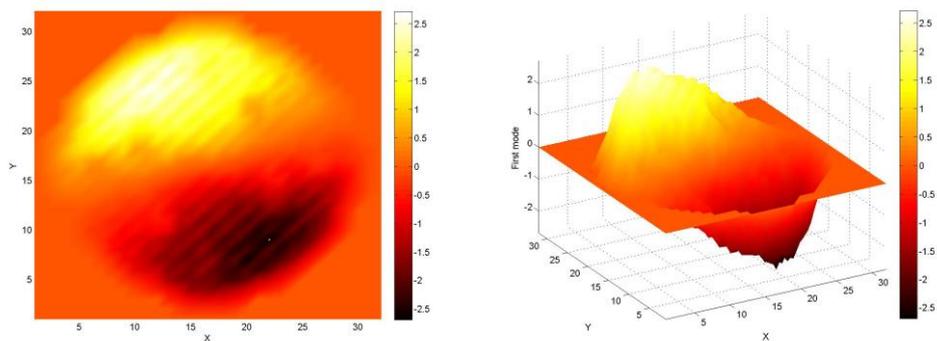


Figura 2. Representación planar y 3D del primer armónico.

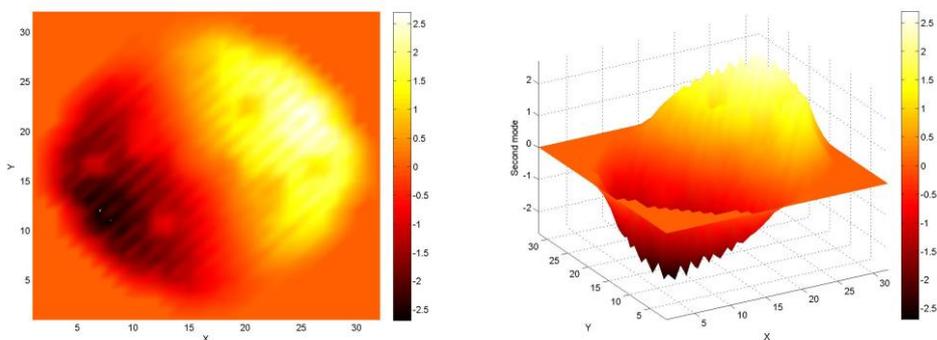


Figura 3. Representación planar y 3D del segundo armónico.

Se ha desarrollado una aplicación llamada *mapping* para obtener la correspondencia de nodos termohidráulicos a neutrónicos teniendo en cuenta la forma de los tres primeros modos Lambda. Primero, el mapa del núcleo se divide en 4 cuadrantes de acuerdo al primer y segundo armónicos. Luego, el código diferencia los elementos combustibles en cada cuadrante de acuerdo a los valores para cada nodo del modo Lambda fundamental, que se dividen en ciertos intervalos, y a las características de diseño del combustible. El modelo de RELAP5 se genera a partir de este mapa del núcleo mediante otro código llamado CMR_Relap.

En la figura 4 se muestra el esquema de la metodología.

Una vez se alcanza el estado estacionario con RELAP5/PARCSv2.7, se afronta el análisis del transitorio. Para ello, se ha desarrollado un nuevo método para introducir inestabilidades a partir de la amplitud y forma de los modos Lambda del flujo neutrónico, provocando una perturbación de densidad. Esta perturbación se obtiene a partir de los modos Lambda obtenidos previamente con el código VALKIN y las amplitudes modales calculadas a partir de las señales de los LPRMs. Existen diversos métodos para obtener estas amplitudes, como por ejemplo la Descomposición en Valores Singulares (SVD) y la Power Modal Decomposition (PMD) [11].

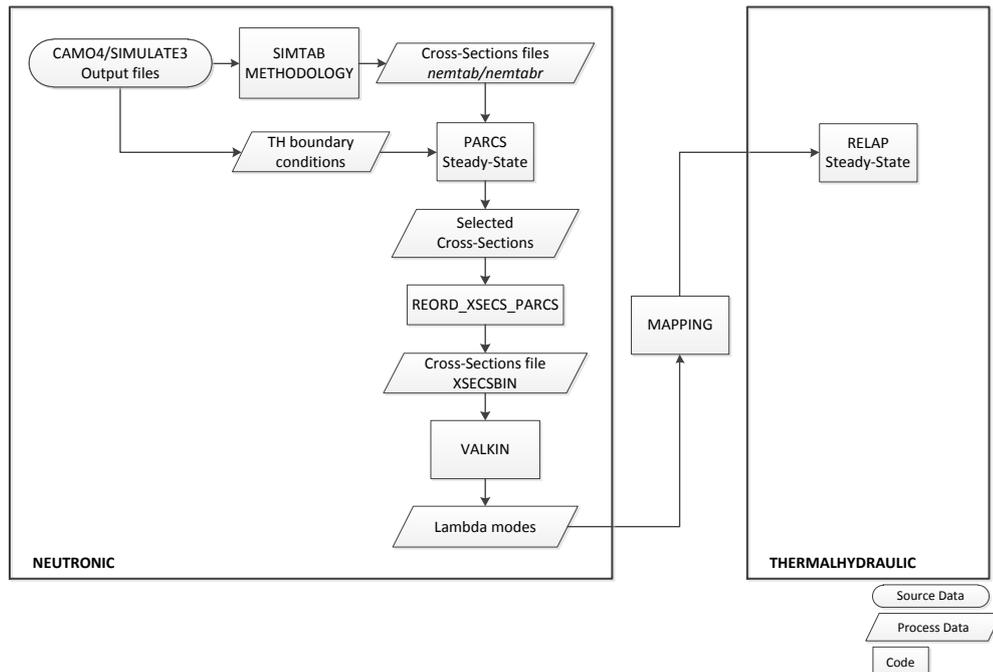


Figura 4. Esquema de la metodología desarrollada.

La perturbación de densidad se aplica en la selección de secciones eficaces de PARCSv2.7. El código fuente ha sido modificado para leer la perturbación desde un fichero externo y aplicarla en las densidades nodales recibidas de RELAP5.

Esta metodología ofrece una herramienta rápida y fiable para realizar distintos análisis de inestabilidad aplicando diferentes perturbaciones.

3. APLICACIÓN

Esta metodología se aplica al reactor Ringhals I con el fin de testarla. Para realizar este test se ha escogido el punto 9 recogido en los datos de la NEA ‘*Ringhals I BWR Stability Benchmark*’ [12], que presenta oscilaciones fuera de fase.

El reactor Ringhals I es un BWR diseño ABB con una potencia térmica nominal de 2270 MW y un flujo másico total de 11550 kg/s.

En trabajos previos, se ha realizado el análisis de estabilidad de este punto de operación del ciclo 14 de combustible [13] aplicando distintas perturbaciones de densidad en todo el núcleo. En este caso, y dado que la metodología desarrollada lo permite, se introducirán perturbaciones de densidad tan solo en los nodos correspondientes al primer nivel axial activo del núcleo. Para ello, el fichero que contiene la componente espacial de los modos Lambda ha sido modificado.

3.1. Modelo Termohidráulico-Neutrónico.

El código termohidráulico utilizado es RELAP5. El núcleo de la central nuclear Ringhals I se ha modelado con 72 canales termohidráulicos. La figura 5 muestra la asignación de canales (obtenida tal y como se explicaba en el punto 2 del presente trabajo), incluyendo el canal del by-pass (número 250). Las características de diseño del combustible se han obtenido de la referencia [12].

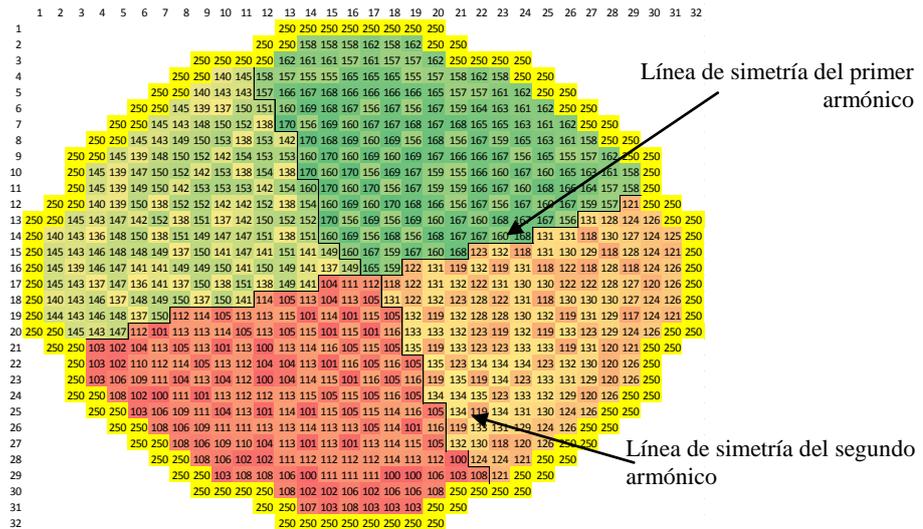


Figura 5. Canales termohidráulicos.

El modelo termohidráulico incluye el núcleo del reactor y el resto de componentes en la vasija: dos lazos de recirculación, el *downcomer* y los plenums superior e inferior. El *downcomer* se ha modelado con un componente *annulus*. Cada lazo de recirculación representa 3 bombas de recirculación. En la figura 6 se muestra la representación en SNAP del modelo de RELAP5.

El código neutrónico PARCS se utiliza para obtener la distribución espacial en 3D del flujo neutrónico y de la potencia, así como su evolución temporal. Los juegos de secciones eficaces necesarios se obtienen mediante la metodología SIMTAB. Las secciones eficaces generadas para este análisis consisten en 1303 composiciones neutrónicas distintas (1300 correspondientes a la parte activa del núcleo y las otras 3 al reflector superior, inferior y lateral) considerando 53 elementos combustibles distintos.

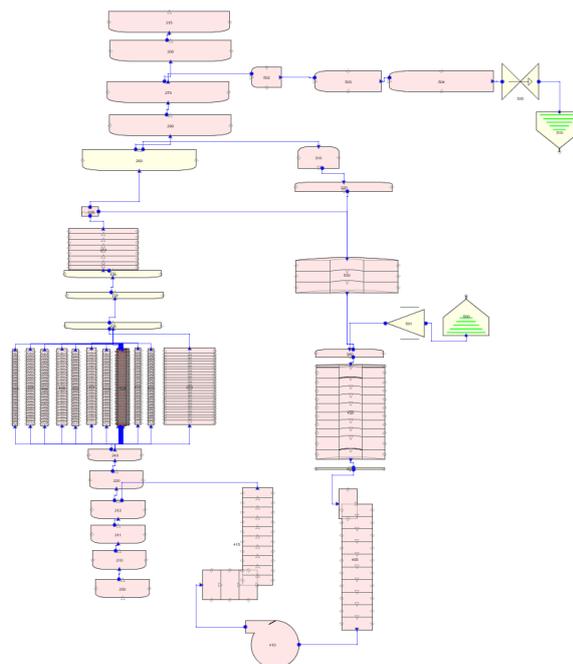


Figura 6. Representación en SNAP del modelo termohidráulico.

Radialmente, el modelo neutrónico se ha obtenido en un modelo uno a uno, es decir, cada elemento combustible está representado por un nodo radial, y el núcleo se ha rodeado con nodos correspondientes al reflector. Por tanto, se ha adoptado una nodalización con 648 nodos radiales activos. Axialmente, el núcleo del reactor se ha modelado con 27 planos axiales, 2 de los cuales, el superior y el inferior, se consideran planos del reflector.

La representación termohidráulica-neutrónica del núcleo del reactor (*mapping*) se ha obtenido tal y como se ha explicado previamente a partir de los modos Lambda obtenidos con el código VALKIN.

3.2. Casos de Estudio.

Los casos de estudio presentados en este trabajo se han escogido para analizar el efecto de la perturbación de los modos azimutales, así como de la del fundamental.

Las amplitudes de los modos obtenidas mediante la presente metodología, aplicando la descomposición en valores singulares a las señales LPRM proporcionadas por el benchmark, se muestra en la siguiente figura:

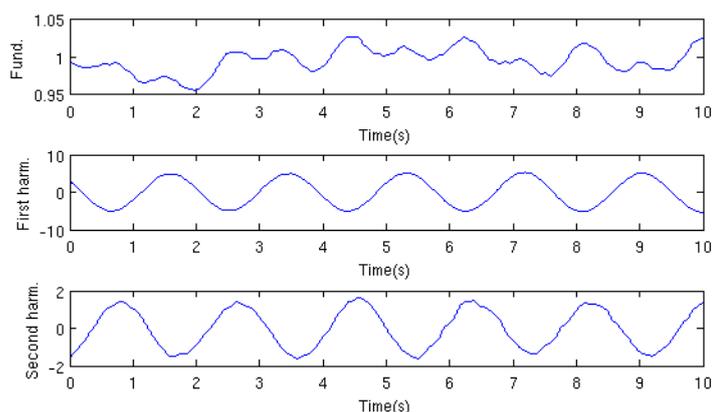


Figura 7. Amplitud de los modos fundamental, primer y segundo armónicos.

Dado el pequeño valor de las amplitudes, se aplica un factor de multiplicación para obtener una perturbación significativa en la densidad. En este caso se aplicarán 4 perturbaciones distintas, definidas en la siguiente tabla:

Tabla I. Características de las perturbaciones.

	Modo fundamental		1º armónico		2º armónico	
	Valor inicial	V. final	Valor inicial	V. final	Valor inicial	V. final
Caso A	2500000	2500000	0.0	0.0	0.0	0.0
Caso B	5000000	5000000	0.0	0.0	0.0	0.0
Caso C	0.0	0.0	2500000	5000000	0.0	0.0
Caso D	5000000	0.0	2500000	5000000	0.0	0.0

3.3. Resultados.

La perturbación se aplica entre los segundos 30 y 40, y el transitorio se simula hasta el segundo 80 para observar su evolución. La evolución de la potencia del reactor durante los distintos transitorios puede verse en la figura 8.

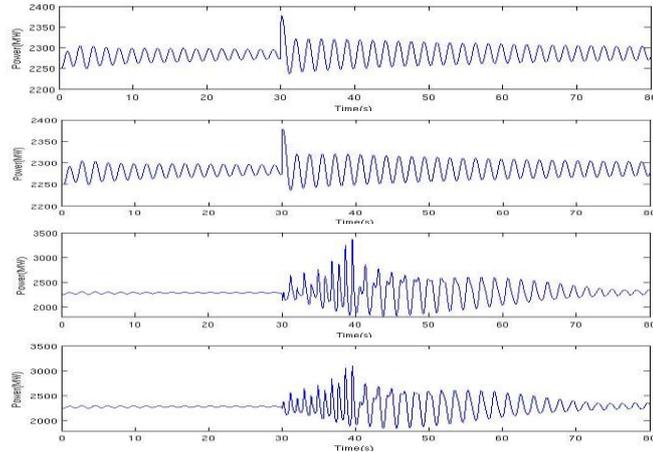


Figura 8. Evolución de la potencia total. Casos A, B, C y D.

Se observan inestabilidades auto mantenidas en los casos C y D, donde el primer modo armónico se ha excitado.

Puesto que se trata de oscilaciones fuera de fase, a continuación se analizan las señales simuladas en las posiciones de los detectores LPRM en ciertas regiones del núcleo. Para ello se ha incluido en PARCSv2.7 la opción de obtener estas señales.

A continuación se muestra la evolución de las señales de los LPRM 2 y 35 en el nivel axial superior para los cuatro casos analizados:

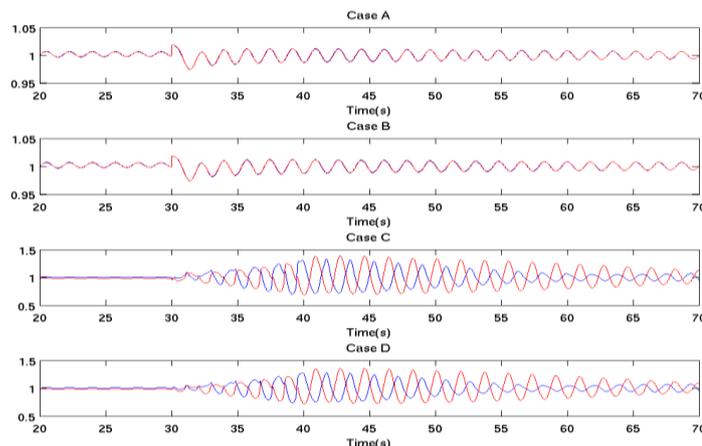


Figura 9. Señal normalizada de los LPRMs 2 y 35 en el nivel axial 4.

Podemos observar como los transitorios donde el primer armónico se ha excitado muestran oscilaciones fuera de fase al comparar distintas regiones del núcleo, además de una mayor amplitud en estas.

Por otro lado, apenas se observan diferencias entre los casos C y D, lo que indica que la oscilación del núcleo esta dominada por la excitación del primer armónico, de lo que podemos extraer que la contribución de la excitación del modo Lambda fundamental es significativamente menor.

4. CONCLUSIONES

Se ha desarrollado una nueva metodología para el análisis de inestabilidades en reactores BWR. Esta metodología se basa en la obtención de los modos Lambda correspondientes al

punto de operación a estudiar del reactor, para así utilizarlos como punto de partida para conseguir una correspondencia adecuada entre nodos neutrónicos y termohidráulicos (*mapping*) y para la generación del patrón espacial de las perturbaciones a aplicar.

Por otro lado, la evolución temporal de la perturbación se obtiene a través de la descomposición en valores singulares de las señales reales de los LPRM de la central nuclear.

Los transitorios por perturbación de densidad inducida se simulan con el código acoplado neutrónico-termohidráulico 3D RELAP5/PARCSv2.7. Los resultados obtenidos muestran que, en el punto de operación escogido, la inestabilidad existente puede reproducirse gracias a esta metodología.

Sin embargo, para la validación de esta metodología se requiere el análisis de un mayor número de transitorios inducidos por distintas perturbaciones.

REFERENCIAS

1. T. H. J. J. Van der Hagen, I. Pászit, O. Thomson, B. Melkerson. "Methods for the determination of the in-phase and out-of-phase stability characteristics of a boiling water reactor". *Nuclear Technology*, 107, pp. 193-214, (1994).
2. J. March-Leuba, E. D. Blakeman. "A Mechanism for Out-of Phase Power Instabilities in Boiling Water Reactors", *Nuclear Science and Engineering*, 107, pp. 173-179, (1991).
3. R. Miró, D. Ginestar, D. Hennig, G. Verdú. "On the regional oscillation phenomenon in BWR's", *Progress in Nuclear Energy*, **Volume 36**, Issue 2, pp. 189-229, (2000).
4. J. L Muñoz-Cobo, O. Roselló, R. Miró, A. Escrivá, D. Ginestar, G Verdú. "Coupling of density wave oscillations in parallel channels with high order modal kinetics: application to BWR out of phase oscillations", *Annals of Nuclear Energy*, **Volume 27**, Issue 15, pp. 1345-1371, (2000).
5. *RELAP5/MOD3.3 Code Manual*. Information Systems Laboratories, Inc., Rockville, Maryland, NUREG/CR-5535/Rev 1-Vol I-VIII (2001).
6. T. Downar, D. Lee, Y. Xu, T. Kozlowski, J. Staundenmier, *PARCSV2.6 US NRC Core Neutronics Simulator* (2004).
7. O. Roselló, *Desarrollo de una metodología de generación de secciones eficaces para la simplificación del núcleo de reactores de agua ligera y aplicación en códigos acoplados neutrónicos termohidráulicos*. Tesis doctoral. UPV. España. (2004).
8. D. Knott, B. H. Forssén, M. Edenius, *CASMO-4. A fuel assembly burn-up program*, Studsvik/SOA-95/2 (1995).
9. J. T. Cronin, K. S. Smith, D. M. Ver Planck, *SIMULATE-3. Advanced three-dimensional two-group reactor analysis code*, Studsvik/SOA-95/18 (1995).
10. R. Miró, D. Ginestar, G. Verdú, D. Hennig, "A Nodal Modal Method for the Neutron Diffusion Equation. Application to BWR Instabilities Analysis", *Annals of Nuclear Energy*, **29**, pp.1171-1194 (2002).
11. F. Maggini, R. Miró, D. Ginestar, G. Verdú. "Two Techniques for the Analysis of the Local Power Range Monitors Readings' under BWR Unstable Conditions", *NSS/MIC 2005*, Puerto Rico, USA (2005).
12. Lefvert, "Ringhals I Stability Benchmark". NEA/NSC/DOC(96) 22, (1996).
13. M. Garcia-Fenoll, A. Abarca, T. Barrachina, R. Miró, D. Ginestar, G. Verdú, "Study of Different Perturbations Applied on Operating Conditions of the Cycle 14 on Ringhals Stability Benchmark with RELAP /PARCS Coupled" *INAC2011*, Belo Horizonte, Brasil (2011).