

# Analisis de un transitorio de inyección de Boro en un reactor PWR con el código acoplado RELAP5/PARCSv2.7

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

Instituto de Seguridad Nuclear, Radiofísica y Medioambiental (ISIRYM)

Universitat Politècnica de València - UPV

Camí de Vera s/n, 46021 Valencia

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

***SINOPSIS** En este trabajo se presenta la implementación de una nueva prestación en el código acoplado RELAP5/PARCS v2.7 que permite analizar transitorios en los que se produce una variación de la concentración de boro en el núcleo. La implementación de la opción de inyección/dilución de boro consiste en la modificación del código fuente para que sea capaz de utilizar tablas de secciones eficaces distintas para diversas concentraciones de boro e interpolar entre ellas, así como en la mejora de la información que comparten estos códigos. Las tablas de secciones eficaces se generan mediante la metodología SIMTAB a partir de CASMO4-SIMULATE3. La sección eficaz  $\Sigma(t_p, d_m)$  se obtiene de estas tablas, para cada nodo  $(x, y, z)$ , mediante la nueva metodología implementada en el código PARCS v2.7, para 0 y 2500 ppm. Luego se interpola linealmente para obtener la sección eficaz  $\Sigma(t_p, d_m)$  para cada ppm $(x, y, z)$  obtenido de RELAP5, entre 0 y 2500 ppm. Si no se está trabajando con el código RELAP5/PARCS v2.7 acoplado, la concentración de boro en cada nodo, ppm $(x, y, z)$ , es igual al valor de ppm introducido en el fichero de entrada de PARCS. La validación de las modificaciones introducidas en los códigos fuente se ha realizado mediante el análisis de un transitorio de inyección de boro en una central nuclear PWR típica. El modelo termohidráulico incluye todos los componentes del lazo primario de un PWR. Los canales termohidráulicos del núcleo se simulan con componentes PIPE. La representación neutrónica del reactor se ha realizado mediante un modelo de canales uno a uno para el núcleo completo. Los resultados obtenidos cualifican el uso de estos códigos para la simulación de este tipo de transitorio.*

## 1. INTRODUCCIÓN

En un reactor de agua a presión (PWR) el control de la reactividad se realiza por medio de dos sistemas separados e independientes: los bancos de barras de control y el Sistema de Control Químico y de Volumen (CVCS) en el circuito primario. Mediante los bancos de barras de control se controlan los cambios en la reactividad en condiciones de operación normal y en transitorios previstos en funcionamiento, limitando el daño a los elementos combustibles. Mediante la inyección o dilución de boro se mantienen los límites de diseño de los elementos combustibles en condiciones de operación. Ambos sistemas son capaces de mantener el reactor subcrítico en condiciones de parada en caliente.

Los transitorios de dilución incontrolada de boro pertenecen a los accidentes por inserción de reactividad (RIA), correspondientes a los accidentes base de diseño de un reactor PWR. Con el fin de simular estos transitorios se ha desarrollado un modelo termohidráulico con el código RELAP5-MOD3.3 [1].

En este trabajo se presentan los resultados de un transitorio de inyección de boro, con el fin de comprobar el modelo termohidráulico desarrollado. Este transitorio se ha simulado utilizando el código acoplado neutrónico-termohidráulico RELAP5-MOD3.3/ PARCSc2.7 [2].

En trabajos previos [3] se añadió una nueva prestación al código acoplado RELAP5-MOD3.3/ PARCScv2.7 gracias a la cual es capaz de analizar transitorios en los cuales se produce una variación en la concentración de boro. La implementación de la opción de inyección/dilución de boro consiste en la modificación del código fuente para que sea capaz de utilizar tablas de secciones eficaces distintas para diversas concentraciones de boro e interpolar entre ellas, así como en la mejora de la información que comparten estos códigos.

Las tablas de secciones eficaces se generan mediante la metodología SIMTAB [4] a partir de CASMO4-SIMULATE3 [5] [6]. En concreto se obtienen, con SIMTAB, 4 ficheros de secciones eficaces correspondientes a las situaciones de barras de control completamente insertadas y completamente extraídas, ambas para dos concentraciones de boro distintas.

La sección eficaz  $\Sigma(t_f, d_m)$  se obtiene de estas tablas, para cada nodo  $(x, y, z)$ , mediante la nueva metodología implementada en el código PARCS v2.7, para 0 y 2500 ppm. Luego se interpola linealmente para obtener la sección eficaz  $\Sigma(t_f, d_m)$  para cada  $ppm(x, y, z)$  obtenido de RELAP5, entre 0 y 2500 ppm. Si no se está trabajando con el código RELAP5/PARCS v2.7 acoplado, la concentración de boro en cada nodo,  $ppm(x, y, z)$ , es igual al valor de ppm introducido en el fichero de entrada de PARCS.

El paper se organiza como sigue: en la sección 2 se explica con detalle el modelo termohidráulico. En la sección 3 se presentan los resultados de la simulación del transitorio de inyección de boro, y en la sección 4 se resumen las conclusiones del trabajo.

## **2. DESCRIPCIÓN DEL MODELO**

Para la simulación se modela un reactor KWU-Siemens de tres lazos. La planta consta de tres generadores de vapor, tres bombas de refrigerante del reactor y un presionador. La inyección de agua borada se realiza y controla mediante el Sistema de Control Químico y de Volumen (CVCS). El agua borada se almacena en un tanque y se inyecta en el núcleo del reactor a través de una de las líneas de la rama fría.

El modelo termohidráulico de este reactor genérico se ha desarrollado mediante el código RELAP5-MOD3.3. El modelo incluye los componentes del circuito primario y también el lazo del secundario de los generadores de vapor. En la Figura 1 se muestra la nodalización del modelo termohidráulico completo. El modelo incluye los tres lazos de refrigerante conectados a la vasija a presión. Cada lazo de refrigerante cuenta con una bomba de refrigerante y el lazo del primario de un generador de vapor. El lado del secundario de los generadores de vapor se ha modelado separado, y se ha conectado con el lado del primario a través de una estructura de calor.

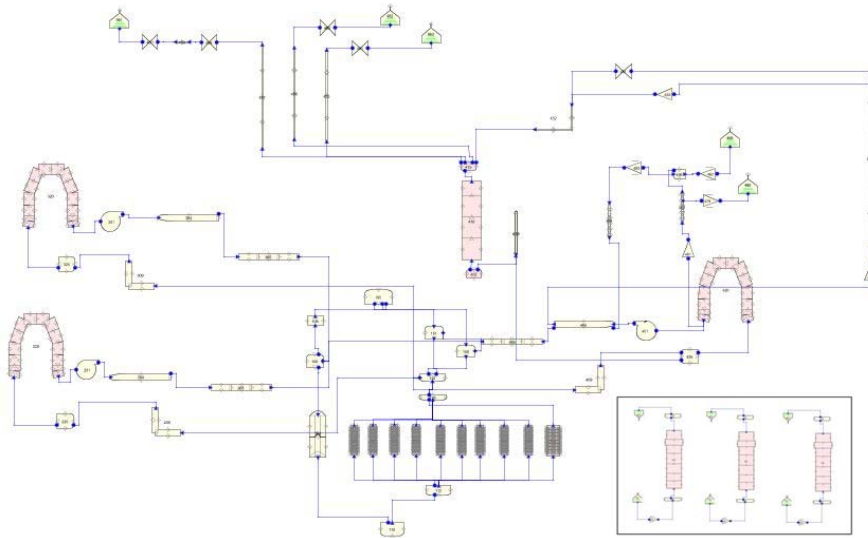


Figura 1.- Representación de la nodalización en RELAP5 mediante SNAP.

El presionador está conectado entre las ramas fría y caliente de uno de los lazos del refrigerante como puede observarse en la Figura 1. El Sistema de Control Químico y de Volumen (CVCS) se ha modelado en ese lazo para que la inyección de boro se realice a través de este sistema.

### Núcleo y vasija

El núcleo se ha modelado con 10 canales termohidráulicos, 9 correspondientes al núcleo y 1 representando el 'by-pass', tal y como se muestra en la Figura 2. Este mapa de canales se ha obtenido de dividir el núcleo en tres regiones, correspondientes a cada lazo de refrigerante, y agrupar los elementos combustibles en cada una de las regiones en tres canales termohidráulicos.

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	
					750	750	750	750	750	750	750					1	
				750	750	750	701	701	703	703	703	750	750	750		2	
			750	750	701	701	701	701	704	704	703	703	703	750	750		3
		750	750	701	701	701	702	702	704	704	704	703	703	703	750	750	4
		750	701	701	701	701	702	702	704	704	704	704	703	703	703	750	5
750	750	701	701	701	702	702	700	700	705	705	704	704	703	703	750	750	6
750	701	701	701	702	702	700	700	700	705	705	704	704	704	703	703	750	7
750	701	702	702	702	702	700	700	700	705	705	705	704	704	704	703	750	8
750	702	702	702	702	700	700	700	700	705	705	705	705	704	704	703	750	9
750	702	702	702	700	700	708	708	708	708	708	708	705	705	705	704	750	10
750	702	700	700	700	708	708	708	708	708	708	708	705	705	705	703	750	11
750	750	700	700	707	708	708	708	708	708	708	708	707	705	705	750	750	12
750	706	706	707	707	707	707	707	707	707	707	707	707	706	706	750		13
750	750	706	707	707	707	707	707	707	707	707	707	707	706	750	750		14
			750	750	706	706	706	706	706	706	706	706	706	750	750		15
			750	750	750	706	706	706	706	706	750	750	750				16
					750	750	750	750	750	750	750						17

Figura 2.- Nodalización del núcleo.

Cada uno de los canales se ha modelado con 34 nodos axiales. Los nodos axiales 1 y 34 representan la región no activa del núcleo.

Los plenums superior e inferior se han modelado utilizando componentes *branch*. El downcomer se ha modelado con un componente *annulus*.

### Lazos del refrigerante

Los tres lazos del refrigerante son idénticos. Las ramas calientes están conectadas a la salida del núcleo, y mediante tuberías se conectan al lado del primario del generador de vapor, que calienta el agua del lado del secundario con una estructura de calor (la temperatura del refrigerante disminuye aproximadamente 30 grados). El agua fría deja el generador de vapor y pasa a través de las bombas de refrigerante, aumentando su presión y momento cinético para ajustarlos a las condiciones de entrada al núcleo. El agua es conducida a través de tuberías a la vasija donde accede a través del downcomer.

### Generadores de vapor

Los generadores de vapor se han modelado de forma muy simple, conectando dos tuberías con una estructura de calor convectiva. La tubería del lado del primario tiene forma de 'U' y se compone de 14 nodos. Cada nodo se conecta mediante la estructura de calor a la tubería del lado del secundario que el agua del secundario atraviesa a una menor presión produciendo vapor.

### Presionador

El presionador se modela en RELAP5 mediante un componente *prizer*. Como puede observarse en la Figura 3, el presionador se conecta mediante una línea de turbulencia a la rama caliente de uno de los lazos del refrigerante. El presionador mantiene el inventario de refrigerante, limita los cambios de presión causados por expansión o contracción termal del refrigerante y controla que la presión del sistema primario no exceda la presión de diseño. Para mantener la presión en el núcleo, el presionador tiene asociadas 4 estructuras de calor que actúan como calentadores eléctricos, calentando el agua cuando la presión disminuye. También se ha modelado el sistema de spray. El sistema de spray se alimenta con el agua de la rama fría. Este sistema se activa automáticamente cuando la presión es mayor que un valor especificado.

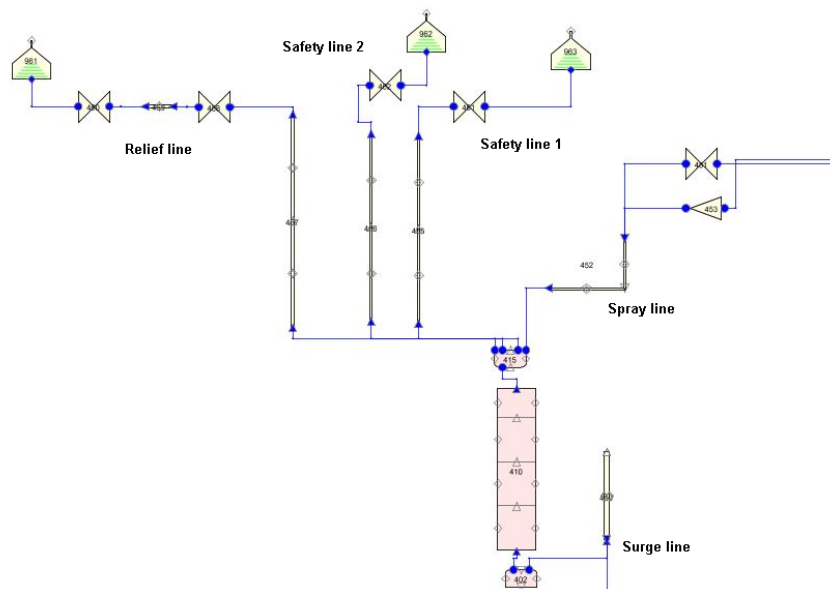


Figura 3.- Vista de SNAP de la nodalización del presionador.

El sistema de control del presionador controla y mantiene la presión y el inventario de agua en el circuito primario del reactor. El control actúa en dos direcciones opuestas: incrementando o disminuyendo la presión en el circuito primario. Para disminuir la presión, el sistema de control abre parcialmente la servo-válvula de la línea de spray pro medio de la comparación entre la presión media de la rama fría y el valor de tarado.

Por otro lado, para incrementar la presión, el control mediante calefacción consiste en cuatro estructuras de calor independientes que proporcionan el flujo de calor necesario para vaporizar el agua del presionador e incrementar el vapor de agua en el presionador. La potencia calorífica máxima de los calentadores es 1.638 MW. El esquema de control proporciona la cantidad de potencia calorífica y el número de calentadores que deben actuar para mantener la presión en el valor de referencia.

### Sistema de Control Químico y de Volumen

El CVCS se ha modelado con el propósito de ajustar la concentración de boro en el sistema de refrigeración primario. El sistema incluye el tanque de control de volumen así como los tanques de almacenamiento que contienen el agua borada y el agua pura. Estos tanques se han modelado mediante componentes *time dependent volumen*. El modelo del CVCS también consta de una línea de purga para mantener constante la masa de agua. La representación en SNAP del modelo del CVCS se muestra en la Figura 4.

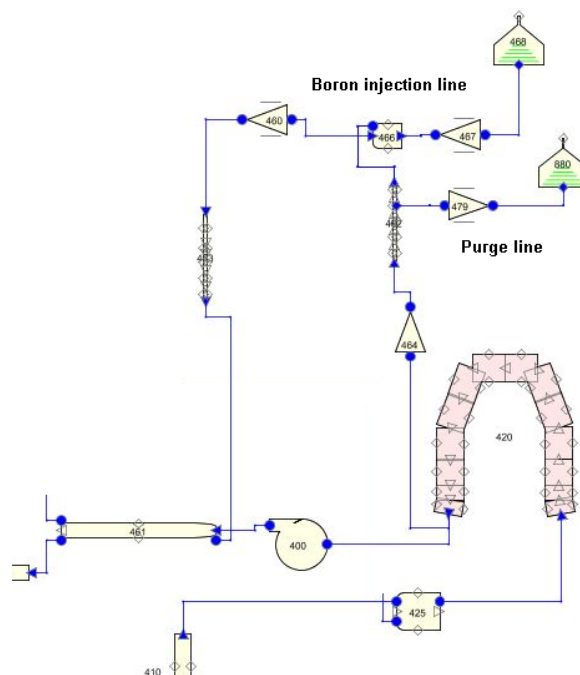


Figura 4.- Vista en SNAP de la nodalización del CVCS.

### Modelo neutrónico

El modelo neutrónico representa el núcleo completo. Cada elemento combustible tiene 236 varillas de combustible y 20 tubos guía. La discretización nodal neutrónica consiste en 177x32



En la Figura 8 se muestra la evolución de la reactividad durante el transitorio. La realimentación debida al efecto Doppler y a la densidad del moderador compensa la reactividad negativa introducida por el incremento de la concentración de boro.

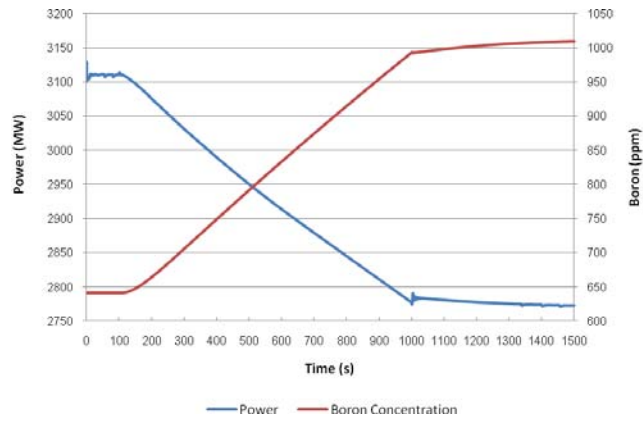


Figura 6.- Evolución de la potencia y de la concentración de boro.

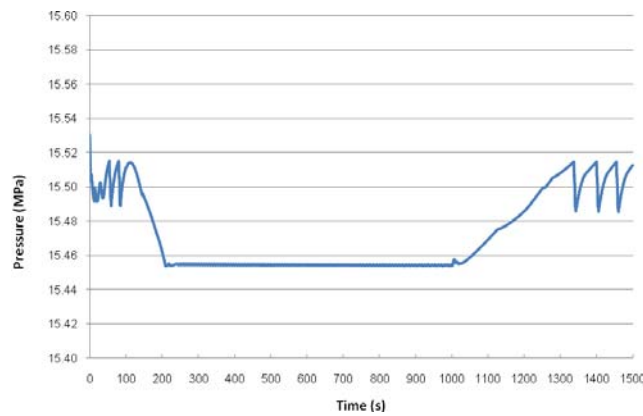


Figura 7.- Evolución de la presión en el plenum superior.

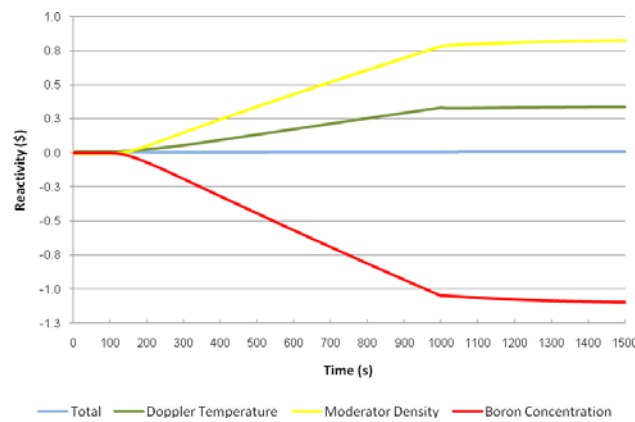


Figura 8.- Evolución de la reactividad.

## 4. CONCLUSIONES

Se ha desarrollado un modelo neutrónico-termohidráulico con el que simular transitorios donde la concentración de boro se modifique.

Con el fin de probar el modelo, este trabajo analiza un transitorio de inyección de boro en un reactor nuclear PWR típico. El modelo termohidráulico incluye todos los componentes del circuito primario de un reactor PWR, los canales de combustible del núcleo modelados con componentes *pipe*, bombas, generadores de presión, presionadores, etc. La representación neutrónica del reactor se ha hecho en base a un modelo de elementos combustibles canal a canal para todo el núcleo.

El transitorio se ha simulado utilizando el código neutrónico-termohidráulico acoplado RELAP5-MOD3.3/ PARCSv2.7. Los parámetros principales analizados son la potencia, la concentración de boro, la reactividad y la presión. La evolución de estos parámetros durante el transitorio muestra que las modificaciones realizadas en RELAP5/PARCSv2.7 están calificadas para modelar este tipo de eventos.

En el futuro, este modelo se utilizará para simular transitorios de dilución de boro que puedan suceder en reactores nucleares tanto durante su operación normal como en circunstancias accidentales.

## REFERENCIAS

1. *RELAP5/MOD3.3 Code Manual*. Information Systems Laboratories, Inc., Rockville, Maryland, NUREG/CR-5535/Rev 1-Vol I-VIII (2001).
2. T. Downar, D. Lee, Y. Xu, T. Kozlowski, J. Staundenmier, *PARCS v2.7 US NRC Core Neutronics Simulator* (2006).
3. C. Pereira, R. Miró, T. Barrachina, G. Verdú, "Implementation of control rod movement and boron injection options by using control variables in RELAP5/PARCS v2.7 coupled code", *INAC 2009*, Rio de Janeiro, Brazil, September 27 to October 2, (2009)
4. 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*. PhD Thesis. UPV, Valencia, Spain (2004).
5. D. Knott, B. H. Forssén, M. Edenius, *CASMO-4. A fuel assembly burn-up program*, Studsvik/SOA-95/2 (1995).
6. 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).