

Efectos de generación y optimización de librerías de secciones eficaces en el análisis de transitorios en reactores PWR

Santiago Sánchez-Cervera¹, Nuria García-Herranz, Diana Cuervo y Carolina Ahnert

Departamento de Ingeniería Nuclear, Universidad Politécnica de Madrid

José Gutiérrez Abascal nº2, 28006, Madrid. España

RESUMEN

Los análisis de los transitorios y situaciones accidentales de los reactores de agua ligera requieren el uso de simuladores y códigos a nivel de núcleo completo con modelos de cinética 3D. Normalmente estos códigos utilizan como datos de entrada librerías de secciones eficaces compiladas en tablas multidimensionales. En este caso, los errores de interpolación, originados a la hora de computar los valores de las secciones eficaces a partir de los puntos de la tabla, son una fuente de incertidumbre en el cálculo del parámetro k -efectiva y deben de tenerse en cuenta. Estos errores dependen de la estructura de la malla de puntos que cubre el dominio de variación de cada una de las variables termo-hidráulicas en las que se tabula la librería de secciones eficaces, y pueden ser minimizados con la elección de una malla adecuada, a diferencia de los errores debidos a los datos nucleares.

En esta ponencia se evalúa el impacto que tiene una determinada malla sobre un transitorio en un reactor PWR consistente en la expulsión de una barra de control. Para ello se han usado los códigos neutrónico y termo-hidráulico acoplados COBAYA3/COBRA-TF. Con este objetivo se ha escogido el *OECD/NEA PWR MOX/UO₂ rod ejection transient benchmark* ya que proporciona unas composiciones isotópicas y unas configuraciones geométricas definidas que permiten el empleo de códigos *lattice* para generar librerías propias. El código de transporte utilizado para ello ha sido el código APOLLO2.8.

Así mismo, ya que se proporcionaba también una librería como parte de las especificaciones, los efectos debidos a la generación de éstas sobre la respuesta del transitorio son analizados. Los resultados muestran grandes discrepancias al emplear la librería del *benchmark* o las librerías propias comparándolas con las soluciones de otros participantes. El origen de estas discrepancias se halla en las secciones eficaces nodales proporcionadas en el *benchmark*.

¹ santiago.sanchezcervera@upm.es

1. INTRODUCCIÓN

Un análisis riguroso de la mayoría de los transitorios en reactores de agua ligera (LWR) requiere la utilización de un acoplamiento entre códigos neutrónicos/termo-hidráulicos basados en métodos de cinética 3D. Este es el caso del accidente de rotura de la línea principal de vapor (MSLB) (Ivanov et al. 1999) o de los transitorios de expulsión de barra de control (Kozlowski et al. 2003), donde la redistribución fuertemente asimétrica del flujo neutrónico no puede ser estudiada empleando modelos de cinética puntual. Los códigos de núcleo con cinética 3D disponibles hoy en día para llevar a cabo análisis *best-estimate* están basados en la teoría de difusión en multigrupos, que requiere como datos de entrada pre-generados tablas de secciones eficaces macroscópicas compiladas en librerías.

Adicionalmente, en los últimos años está habiendo un interés creciente por la identificación de las fuentes de incertidumbre así como una cuantificación de su impacto en cálculos acoplados (Ivanov et al. 2012). Mediante una comprensión de estas fuentes se podrán introducir márgenes adecuados de seguridad y decidir dónde deben realizarse esfuerzos para tratar de reducir estas incertidumbres.

Las incertidumbres neutrónicas son de las principales contribuidoras cuando se modelan y analizan transitorios en LWR, y por ello deben ser evaluadas. Estas incertidumbres provienen no sólo de los datos nucleares sino de los modelos y aproximaciones utilizadas: para obtener la librería de secciones eficaces microscópicas; al producir la librería de secciones eficaces macroscópicas homogeneizadas con los códigos *lattice*; y finalmente al computar los valores de las secciones eficaces en el cálculo de núcleo completo.

En particular, si la librería está compilada en una tabla multidimensional (librería tabulada), los errores de interpolación al calcular los valores de los parámetros son una fuente de error a tener en cuenta. Estos errores de interpolación dependen de la estructura de la malla de puntos que cubre el rango de variación de cada una de las variables TH en las que se tabulan las secciones eficaces. También dependen del algoritmo matemático de interpolación que se utilice.

En el contexto del proyecto NURESAFE se ha utilizado el código *lattice* APOLLO2 para generar librerías de secciones eficaces con el código de difusión COBAYA3 acoplado con el código termo-hidráulico COBRA-TF, para analizar la evolución de un transitorio MSLB. Previamente, estos mismos códigos se han empleado para el análisis de otros transitorios, como el de expulsión de barra de control para un núcleo de referencia con combustible MOX. Este último ejercicio es el que se va a desarrollar en la presente ponencia, tomando las especificaciones de un conocido *benchmark* internacional (Kozlowski et al. 2003).

2. ESPECIFICACIONES Y LIBRERÍAS DE SECCIONES EFICACES

El *PWR MOX/*UO₂ *core transient benchmark* sirvió para evaluar las capacidades de algunos códigos cinéticos para modelar un transitorio de expulsión de barra de control y predecir la respuesta al mismo en un núcleo cargado parcialmente con combustible MOX. Este evento es de particular interés en núcleos con combustible MOX debido a la menor fracción de neutrones diferidos con respecto al UO₂.

El núcleo está basado en un reactor PWR de 4 lazos tipo Westinghouse de 3565 MW_{th} y con 193 elementos combustibles. Su configuración se muestra en la Figura 1 correspondiente a un ciclo de equilibrio compuesto por tres tipos de elementos: frescos, con un ciclo de quemado y con dos ciclos. El combustible tiene composición uniforme en nivel axial.

	1	2	3	4	5	6	7	8
A	U 4.2% (CR-D) 35.0	U 4.2% 0.15	U 4.2% (CR-A) 22.5	U 4.5% 0.15	U 4.5% (CR-SD) 37.5	M 4.3% 17.5	U 4.5% (CR-C) 0.15	U 4.2% 32.5
B	U 4.2% 0.15	U 4.2% 17.5	U 4.5% 32.5	M 4.0% 22.5	U 4.2% 0.15	U 4.2% (CR-SB) 32.5	M 4.0% 0.15	U 4.5% 17.5
C	U 4.2% (CR-A) 22.5	U 4.5% 32.5	U 4.2% (CR-C) 22.5	U 4.2% 0.15	U 4.2% 22.5	M 4.3% 17.5	U 4.5% (CR-B) 0.15	M 4.3% 35.0
D	U 4.5% 0.15	M 4.0% 22.5	U 4.2% 0.15	M 4.0% 37.5	U 4.2% 0.15	U 4.5% (CR-SC) 20.0	M 4.3% 0.15	U 4.5% 20.0
E	U 4.5% (CR-SD) 37.5	U 4.2% 0.15	U 4.2% 22.5	U 4.2% 0.15	U 4.2% (CR-D) 37.5	U 4.5% 0.15	U 4.2% (CR-SA) 17.5	
F	M 4.3% 17.5	U 4.2% (CR-SB) 32.5	M 4.3% 17.5	U 4.5% (CR-SC) 20.0	U 4.5% 0.15	M 4.3% 0.15	U 4.5% 32.5	
G	U 4.5% (CR-C) 0.15	M 4.0% 0.15	U 4.5% (CR-B) 0.15	M 4.3% 0.15	U 4.2% (CR-SA) 17.5	U 4.5% 32.5	Assembly Type	
H	U 4.2% 32.5	U 4.5% 17.5	M 4.3% 35.0	U 4.5% 20.0			CR Position	
							Burnup [GWd/t]	
							Fresh	
							Once Burn	
							Twice Burn	

CR-A Control Rod Bank A
 CR-B Control Rod Bank B
 CR-C Control Rod Bank C
 CR-D Control Rod Bank D
 CR-SA Shutdown Rod Bank A
 CR-SB Shutdown Rod Bank B
 CR-SC Shutdown Rod Bank C
 CR-SD Shutdown Rod Bank D
 O Ejected Rod

Figura 1: Configuración del núcleo

En cuanto a las librerías de secciones eficaces, junto con las especificaciones del propio *benchmark* se proporcionaba una librería en formato NEMTAB y en 2 grupos de energía. Esta librería, que denominaremos LIB-A, fue obtenida con el código *lattice* HELIOS1.7 y con una estructura como se muestra en la Tabla 1.

Tabla 1: Código *lattice* y puntos *branch* para la librería proporcionada en el *benchmark* (LIB-A)

Código <i>lattice</i> empleado: HELIOS1.7- 47G library			
Temperatura comb. (K)	560	900	1320
Concentración boro (ppm)	0	1000	2000
Densidad moder. (kg/m ³)	661.14	711.87	752.06

Partiendo de la geometría y concentraciones isotópicas para cada paso de quemado se ha obtenido una segunda librería (LIB-B) con los mismos puntos de malla que la LIB-A pero generada con el código APOLLO2.8, como se indica en la Tabla 2.

Tabla 2: Código *lattice* y puntos *branch* para la librería generada usando la malla del *benchmark* (LIB-B)

Código <i>lattice</i> empleado: APOLLO2.8 – 281G based JEFF3.1.1 library			
Temperatura comb. (K)	560	900	1320
Concentración boro (ppm)	0	1000	2000
Densidad moder. (kg/m ³)	661.14	711.87	752.06

Por último, se tiene una tercera librería (LIB-C) también generada con APOLLO2.8 pero con una malla de puntos más refinada. Concretamente esta librería se corresponde con un nivel de precisión de 5pcm según el método de optimización descrito en (Sánchez-Cervera et al. 2014). La estructura de la librería se muestra en la Tabla 3.

Tabla 3: Código *lattice* y puntos *branch* para la librería generada usando la malla optimizada (LIB-C)

Código <i>lattice</i> empleado: APOLLO2.8 – 281G based JEFF3.1.1 library								
Temperatura comb. (K)	560	640	720	850	950	1070	1200	1348
Concentración boro (ppm)	0	325	833	1452	2106	-	-	-
Densidad moder. (kg/m ³)	661.14	715.5	772	836	-	-	-	-

3. RESULTADOS

El análisis del benchmark se ha llevado a cabo empleando el solver nodal ANDES del código COBAYA3 acoplado con COBRA-TF para la termo-hidráulica. Se han analizado los ejercicios III y IV del *benchmark*, consistentes en un estado 3D estacionario previo a condiciones HZP y el transitorio en sí.

3.1. PARTE III: CASO ESTACIONARIO

Se comparan las soluciones de varios códigos nodales, tales como PARCS, CORETRAN; de un código de transporte (DeCART) y de otro código específico denominado BARS. La Tabla 4 refleja los resultados obtenidos para cada uno de ellos, especificando en cada caso la librería de secciones eficaces utilizada.

Los resultados a comparar son el valor de la concentración de boro crítico y los errores de potencia por elemento: PWE (Power-weighted error) y EWE (error-weighted error). Su definición analítica puede consultarse en las especificaciones del *benchmark*. Se toma como referencia el código DeCART al ser el código de transporte que utiliza la misma librería en 47G que HELIOS para los cálculos *lattice*. Los códigos nodales utilizan la LIB-A y BARS utiliza una librería propia, con la misma estructura que la LIB-A y LIB-B (es decir que la única diferencia es el código empleado para generarla). COBAYA3 se ejecuta con las tres librerías: LIB-A, LIB-B y LIB-C.

Tabla 4: Comparación de resultados para la parte III del benchmark

Code	Solution method	Library	Critical boron [ppm]	Assembly Power Error	
				%PWE	%EWE
DeCART	Pin heterogeneous MOC transport	47G based on HELIOS 1.8 library	1265	ref	ref
BARS	Pin homogeneous lambda matrix	5G library from UNK	1296	2.65	5.66
PARCS	Nodal diffusion (4 N/FA)	2G nodal LIB-A from HELIOS 1.7	1341	1.05	3.49
CORETRAN	Nodal diffusion (4 N/FA)	2G nodal LIB-A from HELIOS 1.7	1346	1.09	3.72
COBAYA3	Nodal diffusion (4 N/FA)	2G nodal LIB-A from HELIOS 1.7	1345	1.06	3.24
COBAYA3	Nodal diffusion (4 N/FA)	2G nodal LIB-B from APOLLO2	1292	1.70	4.02
COBAYA3	Nodal diffusion (4 N/FA)	2G nodal LIB-C from APOLLO2	1269	1.49	4.19

El acuerdo entre códigos nodales es excelente a igualdad de librería, es decir, cuando todos ellos usan la misma librería (LIB-A). Sin embargo, cuando con COBAYA3 se utiliza la LIB-B los resultados se acercan más a los predichos por BARS y DeCART. Particularmente, con BARS el valor es casi idéntico y con DeCART la diferencia es menor de 50 ppms. Esto implica que hay una diferencia notable entre usar la librería suministrada por el benchmark y utilizar una generada de manera propia, y las soluciones para esta última condición son muy similares.

Finalmente para evaluar la mejoría de la librería optimizada se incluyen las soluciones de COBAYA3 usando la LIB-C, donde se verifica que el valor se aproxima aún más al obtenido por DeCART.

3.2. PARTE IV: TRANSITORIO DE EXPULSIÓN DE BARRA

Centrándonos en el transitorio en sí, se compara la evolución temporal de la potencia, destacando el valor del pico de potencia, la máxima reactividad y la temperatura Doppler alcanzada al segundo de iniciarse el transitorio. En la Tabla 5 se recogen los valores para los diferentes códigos, especificando nuevamente la librería utilizada.

Tabla 5: Comparación de resultados para la parte IV del benchmark

Code	Library	Peak time [s]	Peak power [MW]	Peak power [%]	Maximum reactivity [pcm]	T_{Dop} (t=1s) [K]
BARS	UNK 5G library	0.21	18607	522	1.29	597
PARCS	2G nodal LIB-A	0.34	5052	142	1.12	582
CORETRAN	2G nodal LIB-A	0.33	5926	166	1.14	586
COBAYA3	2G nodal LIB-A	0.34	5725	161	1.11	583
COBAYA3	2G nodal LIB-B	0.23	16955	475	1.15	591
COBAYA3	2G nodal LIB-C	0.23	15847	444	1.15	591

Los resultados muestran que todos los códigos nodales nuevamente ofrecen soluciones similares cuando emplean la misma librería de secciones eficaces, con algunas diferencias debidas al método nodal empleado y/o al esquema de acoplamiento N-TH.

Sin embargo, la solución del código BARS discrepa significativamente del resto. Esta diferencia en el informe final del *benchmark* (Kozłowski et al. 2007) se achacaba a que éste era el único código que no empleaba la librería suministrada, pero no se justificaba claramente. Ahora, la comparación entre COBAYA3/COBRA-TF empleando LIB-A y LIB-B muestra también esta misma discrepancia. Al usar LIB-B, COBAYA3 predice un valor de pico en torno a tres veces superior y un tiempo de pico anterior, acercándose a la solución de BARS. Esto significa que las especificaciones para generar una librería de secciones eficaces propias no se corresponden con la librería suministrada.

Por último, la solución con la librería optimizada ofrece un valor de pico algo inferior al hacerlo con la no optimizada. Concretamente es una diferencia del 7%. En la Figura 2 se representa la evolución para cada uno de los códigos y librerías.

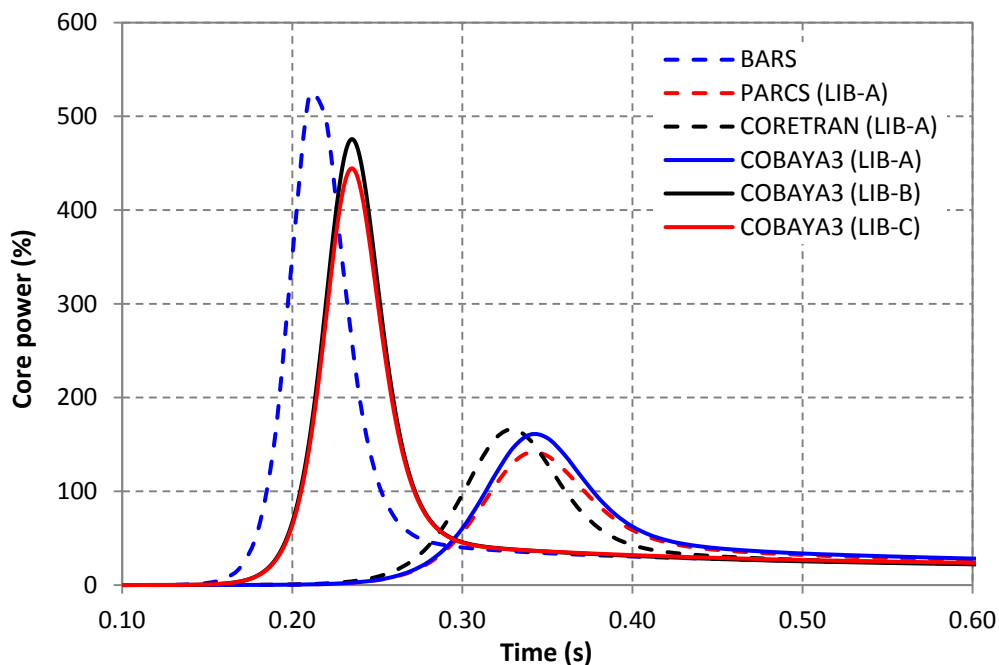


Figura 2: Evolución de la potencia del núcleo durante el transitorio de expulsión de barra de control

4. CONCLUSIONES

En esta ponencia se ha evaluado el impacto de la generación y optimización de librerías de secciones eficaces sobre el *OECD/NEA PWR MOX/UO₂ rod ejection transient benchmark*. Para ello se han empleado 3 librerías diferentes: dos generadas propiamente y la suministrada por el propio *benchmark*.

El estado estacionario previo al transitorio ha sido analizado y los resultados comparados con las soluciones de otros participantes del *benchmark*. El acuerdo de COBAYA3 en la

concentración de boro crítico es mejorado significativamente al emplear la LIB-B y más aún con la LIB-C, respecto a la predicha con LIB-A.

En el análisis del transitorio la LIB-A muestra también notables diferencias con respecto a las soluciones de las otras dos librerías. Con éstas, la excursión de potencia tiene lugar antes en el tiempo y se alcanza un valor de pico mucho mayor. Estas soluciones se acercan mucho a las ofrecidas por el código BARS, único participante en el *benchmark* que generó una librería propia de secciones eficaces. El impacto de la LIB-C (librería optimizada) se aprecia en la disminución del 7% en el valor del pico de potencia.

Estas diferencias tan abultadas radican en las librerías de secciones eficaces, detectándose una inconsistencia entre la librería de secciones eficaces suministrada en el *benchmark* y las especificaciones (geometría e isotopía) dadas para generar una propia.

El proceso de optimización lleva a una malla más refinada, y se ha demostrado que un adecuado refinamiento de la misma puede tener efectos importantes en los resultados. Con ello se comprueba que los errores de interpolación son una fuente no despreciable de error en la solución y su influencia debe ser tenida en cuenta en los análisis *best-estimate*. Estos errores pueden ser reducidos mediante una optimización de la distribución de puntos de forma que se satisfaga un error objetivo impuesto por el usuario.

BIBLIOGRAFÍA

- Ivanov K.N., Beam T.M., Baratta A.J.**, 1999. *PWR Main Steam Line Break (MSLB) Benchmark, Volume I: Final Specifications*. NEA/NSC/DOC(99)8.
- Ivanov K., Avramova M., Kamerow S., Kodeli I. Sartori E., Ivanov E., Cabellos O.**, 2012. *OECD Benchmark for Uncertainty Analysis in Modelling (UAM) for Design, Operation and Safety Analysis of LWRs*. NEA/NSC/DOC(2012).
- Kozłowski T., Downar T.J.**, 2003. *OECD/NEA and US NRC PWR MOX/UO₂ Core Transient Benchmark. Final Specifications, Rev. 2*. NEA/NSC/DOC(2003)20.
- Kozłowski T., Downar T.J.**, 2007. *PWR MOX/UO₂ Core Transient Benchmark. Final Report*. NEA/NSC/DOC(2006)20.
- Sánchez-Cervera S., García-Herranz N., Herrero J.J., Cabellos O.**, 2014. *Optimization of multidimensional cross-section tables for few-group core calculations*. *Annals of Nuclear Energy*, <http://dx.doi.org/10.1016/j.anucene.2014.02.013>