

Covarianzas de las secciones eficaces homogeneizadas en dos grupos de energía para cálculos de difusión

S. Sánchez-Cervera, E. Castro, N. García-Herranz
Universidad Politécnica de Madrid. Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales. Departamento de Ingeniería Energética, Área de Ingeniería Nuclear.
C/ José Gutiérrez Abascal 2, 28006 Madrid
Tel:+34 91.3363112
Email: santiago.sanchezcervera@upm.es

Resumen – Para la realización del ejercicio I-3 del benchmark de UAM se han utilizado diferentes módulos del sistema SCALE para la generación de secciones eficaces macroscópicas homogeneizadas en dos grupos de energía. Se ha llevado a cabo un análisis de las matrices de covarianzas y correlaciones entre diferentes tipos de elementos combustibles y entre diferentes configuraciones.

1. INTRODUCCIÓN

Uno de los objetivos del benchmark de la OCDE Uncertainty Analysis in Modeling (UAM) for design, operation and safety analysis of LWRs (Ivanov et al. 2013) es determinar y cuantificar las incertidumbres en todas las etapas del cálculo acoplado física del reactor/termo-hidráulica en reactores de agua ligera. Este complejo escenario se divide en varios ejercicios, cada uno de los cuales contribuye a la incertidumbre total del cálculo final acoplado del sistema. Estos ejercicios se agrupan en 3 fases: neutrónica, de núcleo y del sistema, siguiendo el esquema de cálculo para el diseño y análisis de seguridad en LWR establecido en la industria nuclear.

La cadena completa de propagación de incertidumbres comienza a partir de las incertidumbres en los datos nucleares básicos y recorre diferentes escalas (multiescala) y fenómenos físicos (multifísica). Cada paso introduce nuevas fuentes de incertidumbre en el proceso por lo que nuevos tipos de incertidumbre deben ser considerados. Particularmente, para la fase I, que es la neutrónica, se tienen los siguientes ejercicios:

- Ejercicio I-1 (Cell Physics) propaga las incertidumbres de las librerías evaluadas de datos nucleares a las librerías en multi-grupos de secciones eficaces microscópicas, usadas como input por los códigos lattice.
- Ejercicio I-2 (Lattice Physics), principalmente propaga las incertidumbres provenientes del Ejercicio I-1 a través de los cálculos lattice a la k-infinito y a las secciones eficaces macroscópicas homogeneizadas y en pocos grupos de energía, que son el input a su vez de los códigos de núcleo.

Sin embargo, aparecen nuevas incertidumbres durante el proceso de generación de secciones eficaces (homogeneizadas) como las incertidumbres *metodológicas* asociadas a los métodos y aproximaciones en la modelización utilizadas en los códigos lattice. Durante este cálculo se aplican varias aproximaciones como la condensación de grupos de energía o la homogeneización del elemento en condiciones de red regular sin tener en cuenta el entorno del mismo. Todas ellas introducen ciertos errores que deben ser tenidos en cuenta y evaluados. Otro tipo de incertidumbres son más *tecnológicas* y provienen de la fabricación del combustible y el elemento. La densidad de la pastilla, las dimensiones de la vaina y del elemento son variables que no son exactas sino que siguen una función de probabilidad.

- Ejercicio I-3 (Core Physics) dedicado a cálculos de núcleo. Las incertidumbres resultantes del ejercicio anterior se propagan a los cálculos de núcleo sin acoplamiento, y a los parámetros resultantes como la k-efectiva. En esta etapa nuevas incertidumbres añadidas

resultan de las aproximaciones asumidas para resolver las ecuaciones neutrónicas, siendo la ecuación de difusión en dos grupos de energía el modelo más habitual a día de hoy en los cálculos de núcleo. También introducen incertidumbres la elección del esquema de discretización espacial y el algoritmo empleado para interpolar las secciones eficaces, como muestra (Sánchez-Cervera et al. 2014).

Para la realización del ejercicio I-3 se requiere una matriz de covarianzas de las secciones eficaces homogeneizadas y en pocos grupos de energía con el fin de propagar las incertidumbres a los resultados finales, como el parámetro k-efectiva. En este trabajo únicamente se van a considerar las incertidumbres debidas a los datos nucleares y no al resto de aproximaciones y modelos que hemos comentado anteriormente. El objetivo de este trabajo es analizar esta matriz de covarianzas requerida para el ejercicio I-3, correspondiente al núcleo del reactor de TMI-I.

2. METODOLOGÍA

2.1. Generación de la matriz de covarianzas

Para generar librerías de secciones eficaces macroscópicas con incertidumbres se ha utilizado la secuencia SAMPLER del sistema SCALE6.2beta3 (Oak Ridge, 2009) con el código NEWT. SAMPLER permite el muestreo aleatorio de datos de entrada de cualquier código de SCALE (en este caso NEWT), para obtener resultados perturbados, cuyo análisis estadístico permite estimar las incertidumbres. Otra opción para el cálculo de incertidumbres habría sido utilizar la secuencia TSUNAMI. Sin embargo, no permite determinar las incertidumbres en algunas respuestas (como factores de discontinuidad o coeficiente de difusión), así como obtener covarianzas.

Se ha generado una librería nominal y 900 librerías perturbadas de secciones eficaces nodales en formato NEMTAB. La generación de las librerías se realiza en dos etapas:

- Primero se utiliza la secuencia SAMPLER/NEWT de SCALE6.2beta3 para el muestrear los datos nucleares (secciones eficaces) y computar 900 conjuntos diferentes de secciones eficaces homogeneizadas macroscópicas para cada tipo de elemento más valores nominales.
- Segundo, se emplea una herramienta auxiliar que se ha desarrollado para convertir esos conjuntos de secciones eficaces en formato NEMTAB y combinarlos en 900 librerías perturbadas más una nominal. Cada librería contiene las secciones eficaces para todos los tipos de elementos correspondientes al mismo índice de perturbación, y permiten llevar a cabo un cálculo de difusión nodal de núcleo completo. La Figura 1 resume el esquema de cálculo seguido.

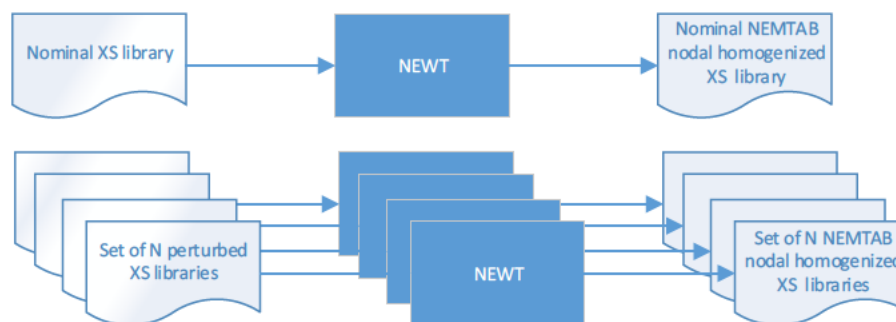


Figura 1. Esquema de la metodología seguida

Las secciones eficaces para cada uno de los 11 tipos de elemento combustible que conforman el núcleo se calculan a través de cálculos de transporte de $\frac{1}{4}$ de elemento en red regular con condición reflectiva y búsqueda de buckling. Se generan también los ADF (Assembly Discontinuity Factors), que se podrán utilizar en códigos de núcleo para corregir el cálculo de difusión. Se ha analizado la necesidad de aplicar autoblandaje a las celdas que presentan veneno consumible tipo WABA, concluyéndose que no es necesario.

Terminadas las 900 ejecuciones para cada tipo de elemento se realiza el análisis estadístico que permite la construcción de la matriz de covarianzas, una por cada tipo de elemento, para posteriormente estudiar la influencia del tipo sobre los términos de la matriz. Cada matriz de covarianzas se obtiene considerando las siguientes variables: k-efectiva, secciones eficaces homogeneizadas en 2 grupos de energía y factores de discontinuidad.

2.2. Estructura de la matriz de covarianzas

Se construye la matriz de covarianzas considerando las siguientes secciones eficaces homogeneizadas: absorción, definida como total menos dispersión, coeficiente de difusión, nu-fisión y dispersión, además de la k-efectiva y los factores de discontinuidad.

Los términos de la matriz covarianzas representan la varianza de la variable (siendo la incertidumbre la raíz cuadrada) en caso de términos de la diagonal, y la covarianza entre dos variables para términos fuera de la diagonal principal, definida aquélla como:

$$\sigma_{xy}^2 = \iint (x - \langle x \rangle)(y - \langle y \rangle) f(x, y) dx dy$$

Habitualmente para expresar la relación entre dos variables se emplea el coeficiente de correlación, en cuyo caso se habla de matriz de correlaciones. En esta matriz los términos de la diagonal son igual a la unidad y el resto de términos un valor entre -1 y 1 atendiendo a la definición del coeficiente de correlación, como muestra la Figura 2.

$$\rho_{xy} = \frac{\sigma_{xy}}{\sigma_x \sigma_y}$$

Correlation interpretation

$\rho = -1$: Direct inverse correlation between x and y

$\rho = 0$: No correlation between x and y

$\rho = 1$: Direct correlation between x and y

Figura 2. Definición del coeficiente de correlación

La Figura 3 muestra un esquema gráfico de la matriz de correlaciones entre las reacciones y grupos de energía, para un tipo de elemento combustible determinado. Se puede construir una matriz de correlaciones completa que incluya las correlaciones entre diferentes tipos de elementos combustibles.

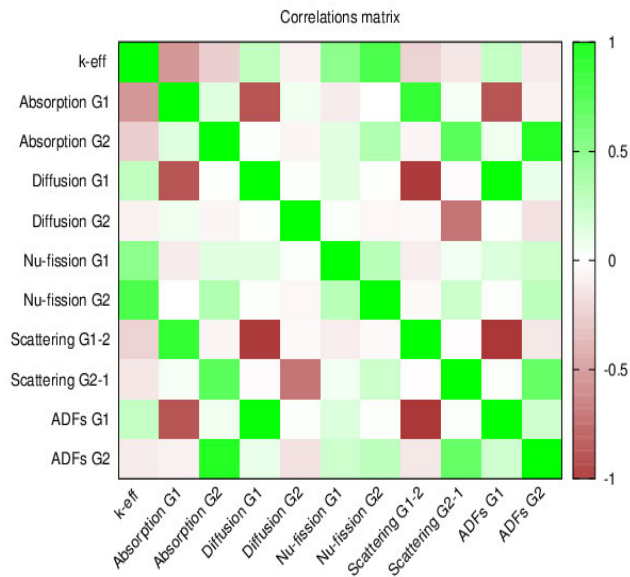


Figura 3. Ejemplo de matriz de correlaciones

3. ANÁLISIS DE LAS MATRICES DE COVARIANZAS

De los 11 tipos de elementos combustibles que integran el núcleo de TMI-1 (ver especificaciones) se va a realizar un análisis comparando las incertidumbres y correlaciones entre los tres tipos de elementos más dispares entre sí, atendiendo al nivel de enriquecimiento y presencia o no de venenos consumibles (WABAs y gadolinio) que son el elemento tipo 2, 7 y 27. Igualmente se estudiará la influencia de la homogeneización en red regular comparando las incertidumbres y correlaciones para casos de red regular, colorset1D y colorset 2D.

3.1. Incertidumbres

La Figura 4 muestra las incertidumbres, en valor relativo, para los tres tipos de elemento considerados. Se aprecia que las incertidumbres de varias secciones eficaces en función del tipo de elemento apenas varía, y que aquellas son mayores para los grupos rápidos, no excediendo nunca del 1.3%

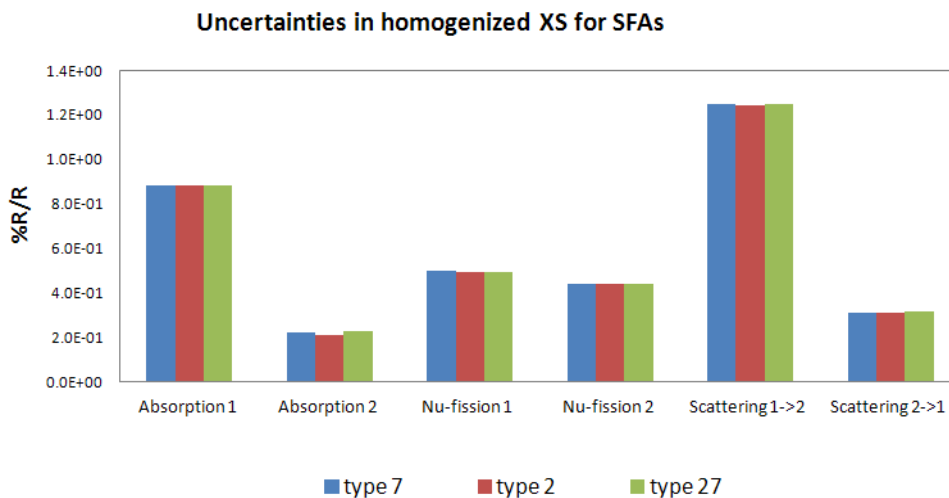


Figura 4. Incertidumbres de XS para diferentes tipos de EC

Sin embargo, la figura 5 muestra que sí que se producen variaciones en las incertidumbres al variar la configuración de homogeneización. Se aprecia que en el colorset 1D, que se corresponde con el elemento combustible ubicado al lado del reflector, las incertidumbres de la dispersión son menores que en las otras dos configuraciones.

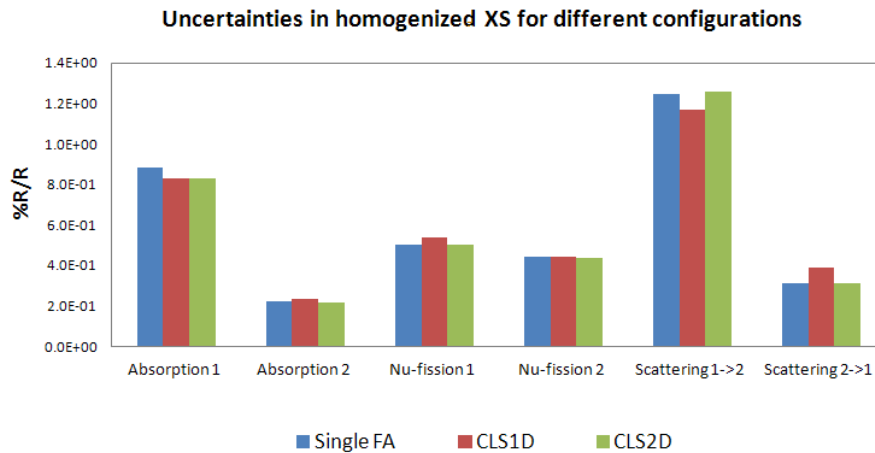


Figura 5. Incertidumbres de XS para diferentes configuraciones

3.2. Correlaciones

La Figura 3 representa la matriz de correlaciones para el elemento tipo 7 (el considerado estándar en las especificaciones). En ella se puede apreciar que las correlaciones más fuertes se producen entre i) coeficiente de difusión y factor de discontinuidad (ADF) ambos del grupo rápido ($R=0.97$), ii) dispersión del 1 al 2 y ADF rápido ($R=-0.935$), iii) dispersión del 1 al 2 y coeficiente de difusión rápido ($R=-0.921$), y iv) sección eficaz de absorción y ADF ambos del grupo térmico ($R=0.87$).

Para el caso de la k-efectiva la correlación más importante la tiene con la sección eficaz de nu-fisión (producción) térmica, como es lógico pues son estos neutrones los que llevan a cabo las reacciones de fisión.

La figura 6 muestra las correlaciones entre la k-efectiva y algunas secciones eficaces de varias reacciones y grupos de energía para las tres posibles configuraciones, y se aprecia como la influencia es muy destacable, sobre todo para el caso del colorset1D. Es especialmente significativa en la dispersión y en el coeficiente de difusión, asociado a las fugas neutrónicas, donde se ve que cuando el elemento está posicionado al lado del reflector el hecho de homogeneizar en condiciones de red regular introduce error por no considerar la vecindad.

Correlations of k-effective for different configurations

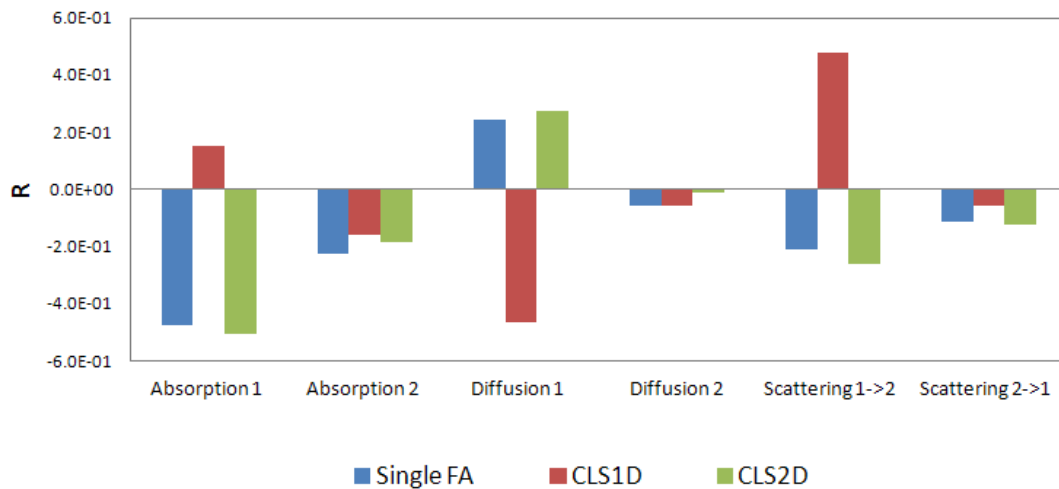


Figura 6. Correlaciones entre la k-eff y diferentes XS para diferentes configuraciones

4. CONCLUSIONES

Se han generado librerías de secciones eficaces homogenizadas en dos grupos de energía con incertidumbres para todos los tipos de elementos combustibles presentes en el ejercicio I-3 del benchmark de UAM. Se han comparado las incertidumbres de estas secciones eficaces y las correlaciones entre ellas para tres tipos diferentes de elemento combustible y diferentes configuraciones. Las conclusiones más destacadas son las siguientes:

- Las incertidumbres son muy similares y no superiores al 1.3% para los diferentes tipos mientras que las correlaciones sí presentan alguna diferencia.
- Para el colorset1D se encuentran cambios destacables respecto a la homogenización en condición de red regular, no así en el caso del colorset 2D
- Las conclusiones previas prueban que que el modelo estándar aplicado en reactores de agua ligera no afecta a las incertidumbres mientras que en las correlaciones errores no despreciables están siendo introducidos en elementos cuya configuración real sea la del colorset1D.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido realizado en el marco del acuerdo en el área de propagación de incertidumbres en los cálculos neutrónicos entre en Consejo de Seguridad Nuclear y la Universidad Politécnica de Madrid (2013-2016).

REFERENCIAS

Sánchez-Cervera S., García-Herranz N., Herrero J.J., Cuervo D., 2014. *Effects of cross sections tables generation and optimization on rod ejection transient analyses*. Annals of Nuclear Energy 73, 387-391

Ivanov, K., Avramova, M., Kamerow, S., Kodeli, I., Sartori, E., Ivanov, E., Cabellos, O., 2013. *Benchmarks for uncertainty analysis in modelling (UAM) for the design, operation and safety analysis of LWRs*. OECD Nuclear Energy Agency Volume I: Specification and Support Data for Neutronics Cases (Phase I)



Oak Ridge National Laboratory, January 2009. SCALE: A Modular Code System for Performing Standardized Computer Analysis for Licensing Evaluation, ORNL/TM-2005/39, Version 6.0. Oak Ridge, Tennessee, USA.