



Propagación de incertidumbre y sensibilidad en librerías master de secciones eficaces con SCALE 6.2-SAMPLER y DAKOTA

C. Mesado, R. Miró, T. Barrachina, G. Verdú
Instituto de Seguridad Industrial, Radiofísica y Medioambiente
Universitat Politècnica de València
Camí de Vera, s/n. 46022 Valencia
Email: cmesado@iqn.upv.es

Resumen – Desde hace algún tiempo se ha venido observando un aumento, sobretodo en el ámbito nuclear, de estudios relacionados con el cálculo de sensibilidad e incertidumbre. Esto es debido principalmente por la introducción, por parte de la Nuclear Regulatory Commission (NRC), de dichos cálculos en los análisis de seguridad mediante códigos Best Estimate. Este hecho ha propiciado el desarrollo de un nuevo módulo llamado SAMPLER en la nueva versión de SCALE 6.2 (actualmente versión beta 4).

El objetivo de este estudio es poder propagar la incertidumbre de las secciones eficaces incluidas en una librería master, a través de un código de quemado, hasta obtener una librería de secciones eficaces colapsadas. La incertidumbre se propaga a través de 3 fases: homogenización, colapso y quemado. Para ello se usa el SAMPLER (módulo de SCALE 6.2) y el DAKOTA. SAMPLER usa una metodología de muestreo estocástica, para ello se crea una librería de perturbaciones con ayuda de la herramienta DAKOTA.

Como resultado se obtiene información detallada de la incertidumbre de la librería de secciones eficaces colapsada a dos grupos y obtenida para un problema en particular (reactor y quemado determinado). Además de los resultados proporcionados por SAMPLER para cada paso de quemado y cada grupo de energía colapsado (coeficiente de correlación, covarianzas, media, desviación típica, etc.), también se analizan los resultados con la herramienta estadística DAKOTA. Esta información de la incertidumbre permite continuar la propagación de la incertidumbre en un código neutrónico de difusión de forma realista.

1. INTRODUCCIÓN

Este trabajo está motivado principalmente por el *benchmark* sobre incertidumbre en un LWR: *OECD Benchmark for Uncertainty Analysis in Best-Estimate Modelling (UAM)* [1]. Este *benchmark* está dividido en 3 fases: 1) neutrónica, 2) núcleo y 3) sistema. En concreto el presente trabajo está centrado en la fase 1 o neutrónica. Esta fase, a su vez, se divide en 3 ejercicios:

- I. Física de celda: obtención de secciones eficaces microscópicas multigrupo.
- II. Física *Lattice*: obtención de secciones eficaces macroscópicas colapsadas.
- III. Física de núcleo: código neutrónico en estado estacionario.

Las principales funciones de dicho *benchmark* incluyen el análisis de sensibilidad e incertidumbre (U&S) en todas las fases de simulación nuclear: tanto en el código neutrónico de quemado como en el posterior código termo-hidráulico (TH) y neutrónico de difusión (NK) acoplados. Este estudio se centra en el análisis U&S de la generación de librerías de secciones eficaces en un código neutrónico de quemado. Para la generación de secciones eficaces, se ha elegido el código SCALE 6.2 beta 3, desarrollado en *Oak Ridge National Laboratory* y ampliamente validado [2], usando los módulos TRITON [3] y NEWT [4] (cálculo de transporte determinista en 2D). Así mismo para el análisis U&S se usa dos códigos distintos, 1) el módulo SAMPLER [5] (método de propagación de incertidumbres tipo Monte-Carlo), también incluido en SCALE y 2) DAKOTA [6] una herramienta estadística desarrollada en *Sandia National Laboratories*.



SAMPLER incorpora una librería de perturbaciones aleatorias de secciones eficaces 1D (MG_Perturbations), esta librería ha sido creada mediante el uso del módulo Medusa incluido en el programa XSUSA. Para ello se ha asumido una función de densidad de probabilidad normal [7] con covarianzas obtenidas de la librería de covarianzas relativas que incorpora SCALE (44groupcov). La librería de perturbaciones contiene 1000 conjuntos de perturbaciones, para 44 grupos de energía, para diversos tipos de reacciones nucleares y para 406 isótopos disponibles. Esta librería de perturbaciones se usa siempre en los cálculos de SAMPLER. La ventaja inmediata es que no hay que calcular las perturbaciones en cada ejecución. Sin embargo, el usuario no tiene, a priori, la libertad de cambiar la distribución o método de muestreo de dichas perturbaciones. Las perturbaciones almacenadas en la librería son factores multiplicativos, ver Ecuación (1) y (2).

$$Q_{x,g} = 1 + \frac{\Delta\sigma_{x,g}}{\sigma_{x,g}} \quad (1)$$

$$\sigma'_{x,g} = Q_{x,g}\sigma_{x,g} \quad (2)$$

donde x representa la reacción en un cierto nucleído y g es el grupo de energía. El valor de $\Delta\sigma_{x,g}/\sigma_{x,g}$ se obtiene de la librería de covarianzas que incorpora SCALE por defecto y $\sigma'_{x,g}$ es la sección eficaz perturbada.

Sin embargo, se decidió crear una librería de perturbaciones propia (opción no incluida en SAMPLER) a partir de las matrices de correlación y covarianza para cada isótopo. De este modo se da al usuario mayor libertad ya que es este quien introduce el tipo de función de distribución de probabilidad (PDF) y los parámetros estadísticos que la definen para cada isótopo a perturbar (media y desviación estándar). Las perturbaciones se crean usando la herramienta DAKOTA. Esta librería de perturbaciones se usa para generar la librería de secciones eficaces dependiente para un reactor y quemado en concreto. Para ello, a partir de los segmentos reales del reactor y los inputs de CASMO, se generan los modelos necesarios de SCALE. Con estos se propaga la incertidumbre de las secciones eficaces dependientes del problema, colapsadas a 2 grupos de energía y homogenizadas por segmento. En concreto los parámetros de salida son 7:

- Coeficiente de difusión para el grupo de energía 1 y 2.
- Sección eficaz de absorción para el grupo de energía 1 y 2.
- Sección eficaz de fisión multiplicada por el número medio de neutrones liberados por fisión para el grupo de energía 1 y 2.
- Sección eficaz de dispersión del grupo 1 al 2.

Conviene señalar que se ha automatizado toda la metodología para una mayor versatilidad. Ver la siguiente sección para una descripción más detallada de la metodología.

2. METODOLOGÍA

La metodología seguida para el ANÁLISIS U&S de las secciones eficaces dependientes del problema se puede resumir en los siguientes puntos. La Figura 1 muestra la representación esquemática del diagrama de flujo.

1. Traducir los inputs de CASMO a SCALE según los segmentos proporcionados del punto de operación del reactor.
2. Identificar los isótopos que se van a perturbar de acuerdo a la opción de SCALE *addnux*, para este estudio igual a 3.

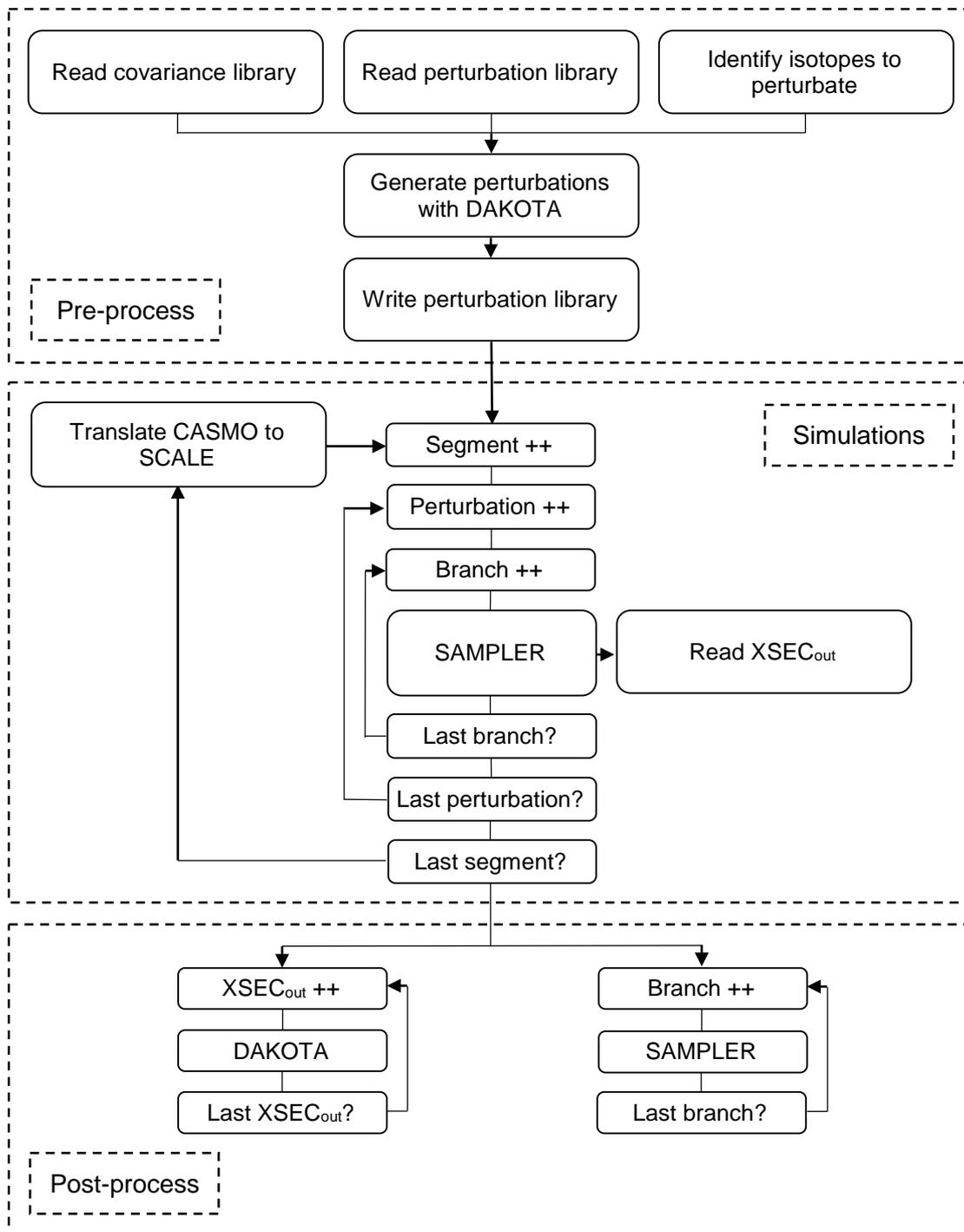


Figura 1: Diagrama de flujo de la metodología completa

3. Generar la nueva librería de perturbaciones de acuerdo a la librería de covarianzas proporcionada. Se usa para ello DAKOTA. Se anulan las perturbaciones de los isótopos no identificados en el paso anterior.
4. Usar dicha librería para lanzar, con el módulo SAMPLER, n casos de cada segmento, con las correspondientes variaciones de variables instantáneas. En este estudio $n=146$ y $branches T_f=7, T_m=3$ y $D_m=7$.

5. Procesar todos los valores de secciones eficaces dependientes del problema y realizar un ANÁLISIS U&S siguiendo dos metodologías distintas: SAMPLER y DAKOTA.

2.1 Traducción automática CASMO-SCALE

La elección de SCALE para la generación de las secciones eficaces es debida a su libertad para el usuario a la hora de definir la geometría, composiciones, neutrónica... Las secciones eficaces de salida están colapsadas a dos grupos de energía (límite de energía 0.625 eV) y homogenizadas para cada segmento -o composición diferente en el código de difusión neutrónica-.

El usuario ha de definir los puntos correspondientes a las variables instantáneas. A partir de estos estados de operación del reactor, SCALE obtendrá las correspondientes secciones eficaces. No sólo es importante definir bien el número de puntos para obtener una buena aproximación, sino que también es importante el rango que estos abarcan. Este paso es importante ya que dichas variables instantáneas han de cubrir todas las posibles eventualidades que posteriormente se requiera simular con el código de difusión neutrónica. Las variables instantáneas definidas para este trabajo son las siguientes.

Tabla 1: Variables instantáneas

T_{fuel} (K)	293.0	660.8	1028.6	1396.5	1764.3	2132.2	2500.0
Void (%)	0	40	80	90	95	99	100
T_{moderator} (K)	293	393	493				
Control Rods	No	Yes					

La combinación de estas variables instantáneas suma un total de 294 estados diferentes -o *branches* en los modelos de SCALE-. Además, estos estados se han de simular para cada segmento definido, hay un total de ocho segmentos diferentes, tres de ellos reflectores.

Los modelos de SCALE se han obtenido a partir de los archivos de entrada de CASMO (ver Figura 2 izquierda). Además se ha seguido las recomendaciones de los desarrolladores de SCALE [8] para modelar varillas con absorbentes fuertes -venenos neutrónicos presentes en BWR- como el Gadolinio. Podemos resumir estas recomendaciones en tres. 1) Dichas varillas se han modelado usando diversos anillos concéntricos (ver Figura 3), 2) el tratamiento de celda se realiza con la opción de región múltiple, 3) controlar el paso de tiempo entre quemados (entre 0.5 y 1.0 Gwd/MTU antes del pico de reactividad y 2.0 Gwd/MTU después) y 4) los absorbentes fuertes se queman usando flujo constante en vez de potencia constante.

Además se han obtenido y aplicado los factores Dancoff mediante el módulo McDancoff (ver Figura 2 derecha). Estos factores, también recomendados en [8], son especialmente importantes para BWR, donde debido al efecto físico del vapor generado hay más heterogeneidades entre las varillas centrales y las de la periferia.

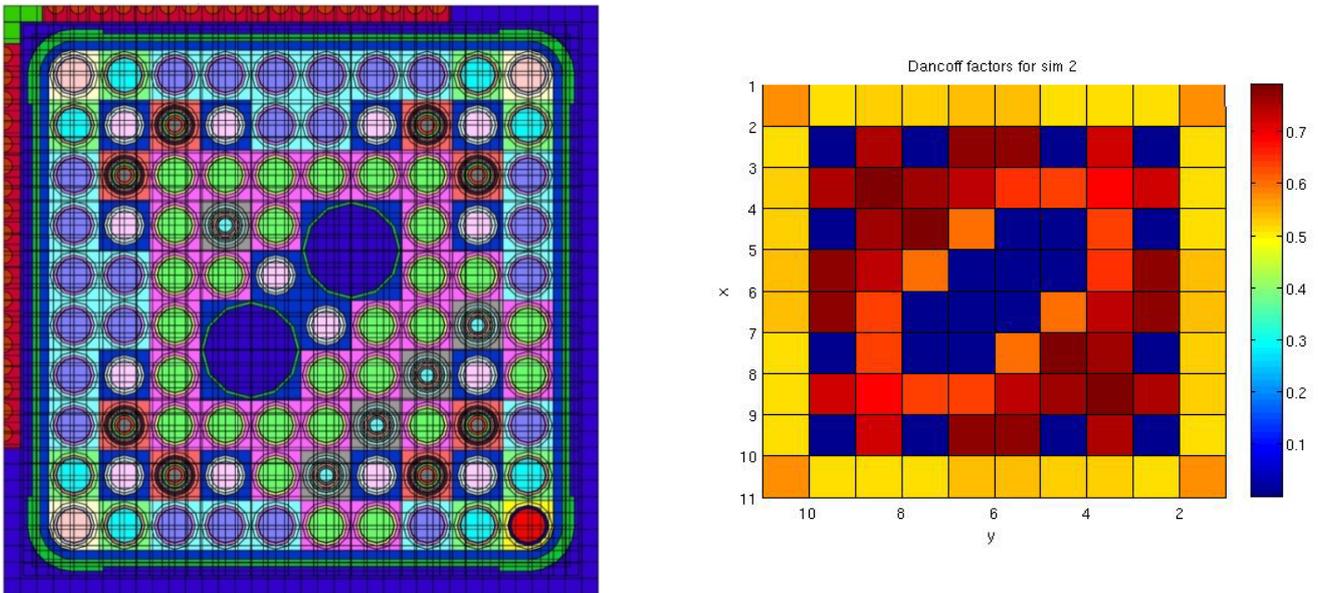


Figura 2: Modelo de SCALE para un elemento combustible (izquierda) y representación gráfica de sus factores Dancoff (derecha)

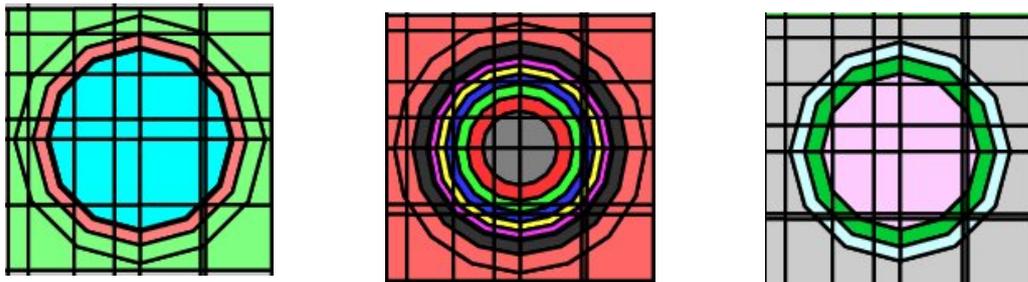


Figura 3: Detalles de diversas varillas. Combustible (izquierda), varilla con absorbente fuerte (centro) y tubo guía (derecha)

Más detalles sobre el modelo de SCALE y su comparación con los resultados de CASMO y SIMULATE pueden encontrarse en [9] y [10].

2.2 Identificación de isótopos (parámetros de entrada)

Primeramente hay que leer tanto la librería de covarianzas de SCALE (44groupcov), como la librería de perturbaciones que trae SCALE por defecto (MG_Perturbations).

- **44groupcov:** dispone de 2587 datos de secciones eficaces y 2546 matrices de covarianza, ambos colapsados a 44 grupos de energía.
- **MG_Perturbations:** dispone de 1000 perturbaciones de 406 isótopos diferentes, cada uno con diversas reacciones nucleares (como media hay 4.5 reacciones nucleares por isótopo) y también colapsados a 44 grupos de energía.

A continuación, dependiendo de la opción *addnux* que se indica al módulo TRITON, SCALE incorpora trazas de diversos elementos en el cálculo del quemado (para este estudio *addnux=3*). Sin embargo, de estos isótopos hay que restar los que no se encuentran en la librería de covarianza (no se dispone de su varianza para generar las perturbaciones correspondientes) y los que no se encuentren en la librería de perturbaciones. De la misma forma, habrá que eliminar las reacciones nucleares que no estén en ambas librerías. De los isótopos restantes, cada

combinación de reacción nuclear y grupo de energía se considera un parámetro de entrada y por tanto a perturbar.

Finalmente, se consideran 226 isótopos diferentes para este estudio. Sin embargo, para obtener el número total de parámetros a perturbar, multiplicamos cada isótopo por su correspondiente número de reacciones nucleares y por 44 grupos de energía, obteniendo 9711 parámetros de entrada.

2.3 Generación de la nueva librería de perturbaciones

A partir de los parámetros de entrada a perturbar identificados en el paso anterior, se generan una serie de perturbaciones aleatorias con la herramienta estadística DAKOTA. Todos los parámetros a perturbar siguen una distribución normal con una desviación estándar obtenida de la librería de covarianzas. El número de perturbaciones a generar (y por tanto el número de simulaciones a lanzar) viene determinado por la fórmula de Wilk's, ver Ecuación 3, que para un 95% de incertidumbre, 95% de confianza con doble límite de tolerancia es de 93 [11], sin embargo estudios posteriores [12] demuestran que habría que realizar 146 perturbaciones. En este estudio se sigue esta última aproximación (146).

$$1 - \alpha^n - n(1 - \alpha)\alpha^{n-1} \geq \beta \quad (3)$$

A partir de las perturbaciones aleatorias generadas por DAKOTA, se genera una nueva librería de perturbaciones para el SCALE. Los isótopos que no se han perturbado, bien por no encontrarse en el modelo de SCALE o bien por no encontrarse en la librería de covarianzas, se anula la perturbación introduciendo el valor de 1 (para SCALE las perturbaciones son factores multiplicativos, ver Ecuación 2).

2.4 Propagación de incertidumbres con SAMPLER

Con la nueva librería de perturbaciones se realizan las simulaciones con el módulo SAMPLER indicando 146 como el número de muestras y las secciones eficaces colapsadas y homogenizadas como respuesta al análisis. Debido al alto esfuerzo computacional (8 segmentos, 146 perturbaciones, con y sin barras de control y 7x3x7 variaciones de variables instantáneas) se simula sólo el combustible fresco, para ello se introduce un tiempo de quemado muy pequeño.

El SAMPLER se encarga de aplicar las perturbaciones a la librería de secciones eficaces master para cada isótopo, reacción nuclear y grupo de energía. A partir de la librería master perturbada, SAMPLER ejecuta las 147 simulaciones de forma independiente (146 perturbaciones, más una nominal).

2.5 Post-procesado de las secciones eficaces colapsadas y homogenizadas

Una vez se dispone de todas las secciones eficaces dependientes del problema homogenizadas y colapsadas, hay que procesar los datos para así realizar el ANÁLISIS U&S. Este se realiza siguiendo dos metodologías distintas, una con el SAMPLER y la otra con el DAKOTA.

La metodología del SAMPLER se efectuaría automáticamente al terminar las simulaciones. Sin embargo, parece existir un error en el código beta de SCALE 6.2 que no permite el post-procesado cuando hay *branches*. Por tanto, se ha desarrollado una metodología equivalente que consiste en hacer creer a SCALE que hay tantas simulaciones distintas como *branches*. De esta forma el SAMPLER sí puede realizar el análisis U&S para cada simulación individual. El SAMPLER es capaz de obtener matrices de correlación y covarianza entre otros datos estadísticos. Información detallada de esta metodología se encuentra en [13].

La metodología del DAKOTA, al igual que la del SAMPLER, realiza el análisis de U&S a cada paso de quemado (análisis dependiente del índice, en este caso tiempo). Consiste en indicarle al DAKOTA las perturbaciones que se han generado anteriormente y el valor de cada sección eficaz de salida para las 146 perturbaciones. Con esta información el DAKOTA es capaz

de obtener valores medios, desviaciones estándar, valores de sensibilidad... Esta metodología ya ha sido aplicada con éxito en un código acoplado TH-NK, tanto a parámetros neutrónicos [14] como a variables termo-hidráulicas [15].

3. RESULTADOS

En este apartado se muestran tanto los resultados de la metodología SAMPLER como los del DAKOTA. Como se comentó en el apartado anterior el proceso se repite para cada segmento del reactor y para cada combinación de variables instantáneas, por tanto la cantidad de resultados a procesar es elevada. En este artículo sólo se muestran los resultados para un determinado segmento y combinación de variables instantáneas. Sin embargo, se han procesado todos los resultados de cada segmento y por tanto, sería viable continuar la propagación de las incertidumbres con un código TH-NK acoplado.

3.1 Metodología SAMPLER

El módulo SAMPLER obtiene una gran cantidad de datos estadísticos basados en las distintas perturbaciones generadas anteriormente. En la Figura 4 se muestra gráficamente la matriz de correlación entre los distintos parámetros de salida. Se aprecia que las secciones eficaces fuertemente relacionadas son, por un lado la sección eficaz elástica del grupo 1 con el coeficiente de difusión de grupo 1 (correlación negativa), y por otro lado la sección eficaz de fisión del grupo 2 con la sección eficaz de absorción de grupo 2 (correlación positiva). Las demás correlaciones se consideran débiles. Hay que comentar que el módulo SAMPLER, a diferencia del DAKOTA, no obtiene los coeficientes de correlación entre los parámetros de entrada y salida.

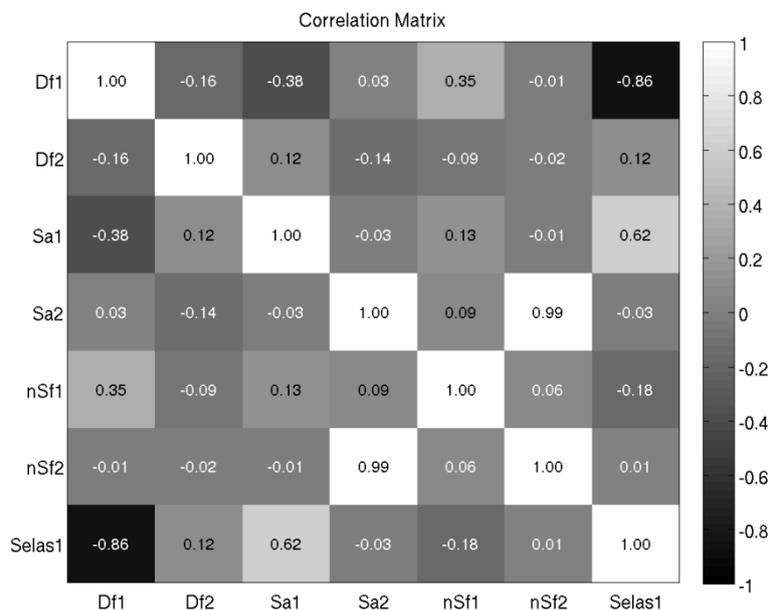


Figura 4: Matriz de correlación de los parámetros de salida para unas ciertas variables instantáneas

En la Figura 5 se muestran los histogramas y el gráfico de dispersión (según la perturbación) para el coeficiente de difusión y la sección eficaz de absorción, ambos del grupo 1. Los histogramas pueden ser útiles para la determinación de normalidad de los parámetros de salida, usando para ello un test estadístico. El segundo gráfico permite al analista visualizar la distribución de los valores obtenidos en el espacio y además determinar si existen muchos puntos fuera de los límites 2σ .

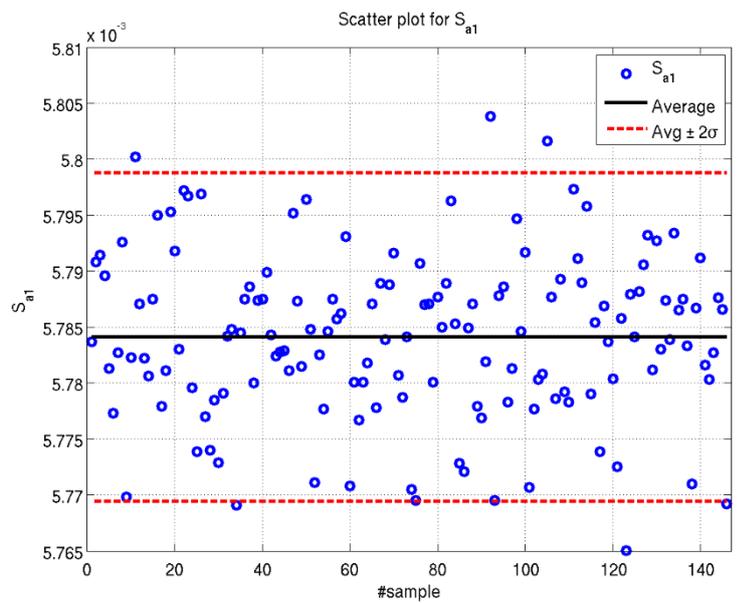
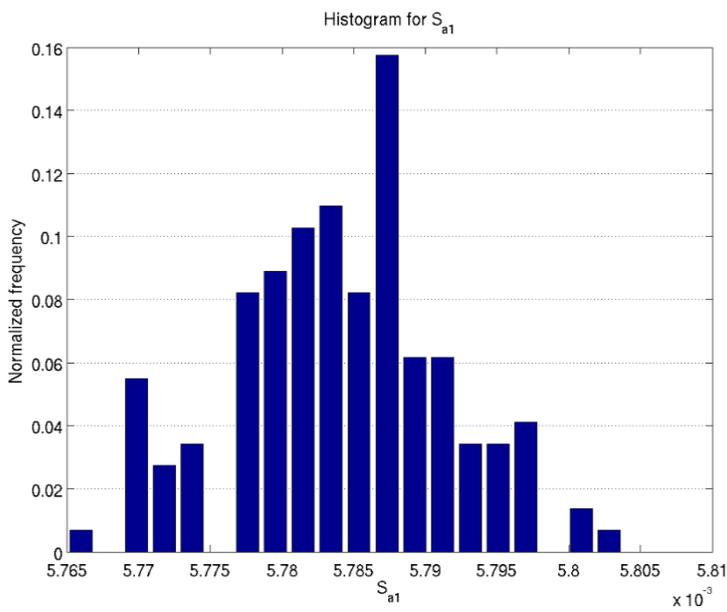
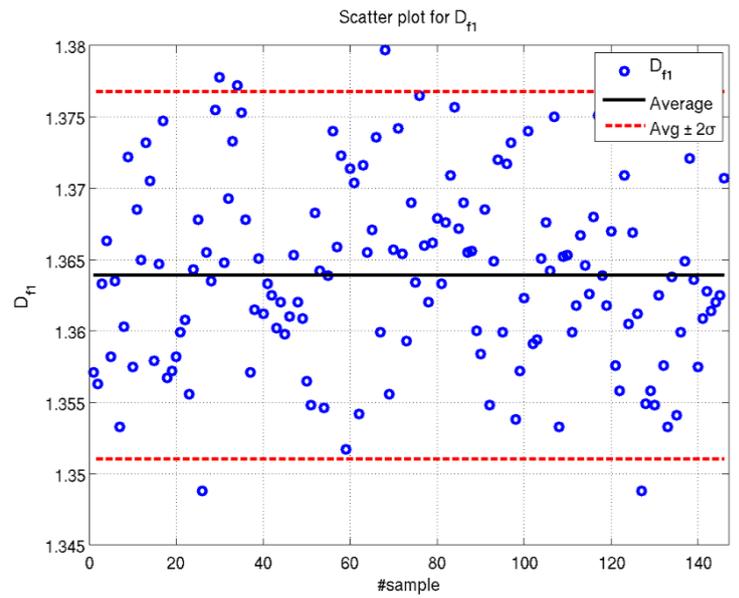
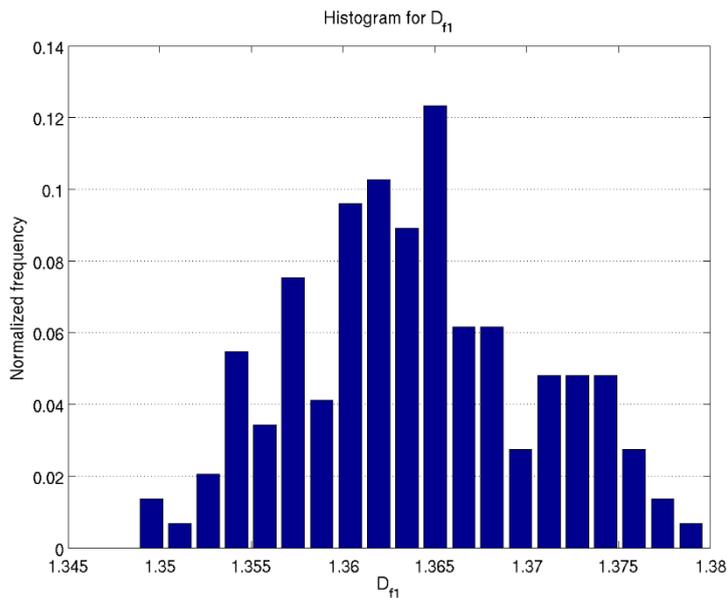


Figura 5: Histograma (izquierda) y nube de puntos (derecha) para el coeficiente de difusión (arriba) y la sección eficaz de absorción (abajo), ambas del grupo de energía rápido

Tabla 2: Medias de los parámetros de salida para diversas fracciones de huecos, temperatura de moderador 493 K, temperatura del combustible 2500 K y barras de control insertadas

Frac (%)	D_{f1}	D_{f2}	S_{a1}	S_{a2}	$\text{nu} \cdot S_{f1}$	$\text{nu} \cdot S_{f2}$	S_{elas1}
0	1.423	3.283E-1	8.898E-3	3.789E-2	2.661E-3	2.847E-2	5.760E-1
40	1.639	4.357E-1	8.459E-3	3.574E-2	2.461E-3	2.712E-2	4.518E-1
80	1.936	6.325E-1	7.462E-3	3.348E-2	2.133E-3	2.456E-2	3.274E-1
90	2.029	7.081E-1	7.032E-3	3.292E-2	2.005E-3	2.353E-2	2.964E-1
95	2.080	7.520E-1	6.786E-3	3.266E-2	1.929E-3	2.292E-2	2.809E-1
99	2.123	7.905E-1	6.611E-3	3.246E-2	1.860E-3	2.238E-2	2.687E-1
100	2.135	8.006E-1	6.590E-3	3.242E-2	1.841E-3	2.224E-2	2.657E-1



Tabla 3: Desviación estándar de los parámetros de salida para diversas fracciones de huecos, temperatura de moderador 493 K, temperatura del combustible 2500 K y barras de control insertadas

Frac (%)	D_{f1}	D_{f2}	S_{a1}	S_{a2}	$nu \cdot S_{r1}$	$nu \cdot S_{r2}$	S_{elas1}
0	6.862E-3	2.307E-4	1.167E-5	6.127E-6	1.038E-5	5.031E-6	1.551E-3
40	8.681E-3	3.641E-4	1.091E-5	6.406E-6	9.271E-6	5.024E-6	1.426E-3
80	1.245E-2	7.126E-4	9.272E-6	8.365E-6	7.648E-6	5.390E-6	1.397E-3
90	1.415E-2	8.905E-4	8.571E-6	9.449E-6	7.111E-6	5.646E-6	1.425E-3
95	1.524E-2	1.008E-3	8.181E-6	1.016E-5	6.823E-6	5.855E-6	1.451E-3
99	1.633E-2	1.121E-3	7.919E-6	1.083E-5	6.600E-6	6.090E-6	1.483E-3
100	1.665E-2	1.152E-3	7.908E-6	1.102E-5	6.557E-6	6.152E-6	1.494E-3

En las Tabla 2 y Tabla 3 se muestran los valores medios y desviaciones estándar de los parámetros de salida en función de la fracción de huecos. Las demás variables instantáneas son: temperatura del moderador 493 K, temperatura del fuel 2500 K y barras de control insertadas.

Antes de pasar a los resultados obtenidos con la metodología DAKOTA, señalar que el SAMPLER obtiene matrices de covarianzas, medias móviles... entre otros.

3.2 Metodología DAKOTA

Además de las medias y desviaciones estándar, obtenidas también con el SAMPELR, DAKOTA obtiene valores de asimetría y Curtosis para los parámetros de salida. También muestra los límites de confianza para la media y la desviación estándar. Sin embargo el punto fuerte del DAKOTA es la realización del estudio de sensibilidad entre los parámetros de entrada y salida, opción no disponible en la versión beta del SAMPLER.

Desde la Figura 6 a la Figura 9 se muestra el análisis de sensibilidad como valores del coeficiente de correlación parcial por rangos (Partial Rank Correlation Coefficient – PRCC) entre los distintos parámetros de entrada y de salida. En concreto se han recogido los 10 parámetros de entrada (combinación de isótopos, reacción nuclear y grupo de energía) que más influyen en cada una de las secciones eficaces seleccionadas. De acuerdo a estudios anteriores, 12[14], un parámetro es considerado significativo si su PRCC es mayor que 0.16.

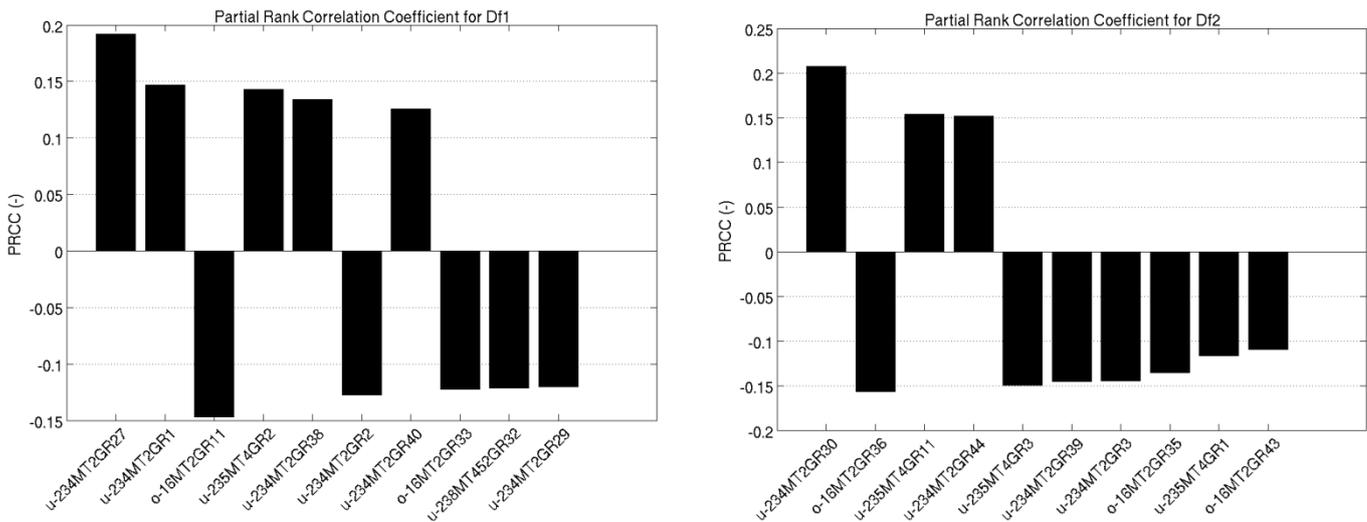


Figura 6: Coeficiente de correlación de rango parcial para el coeficiente de difusión en función de los isótopos, reacciones nucleares y grupos de energía más sensitivos

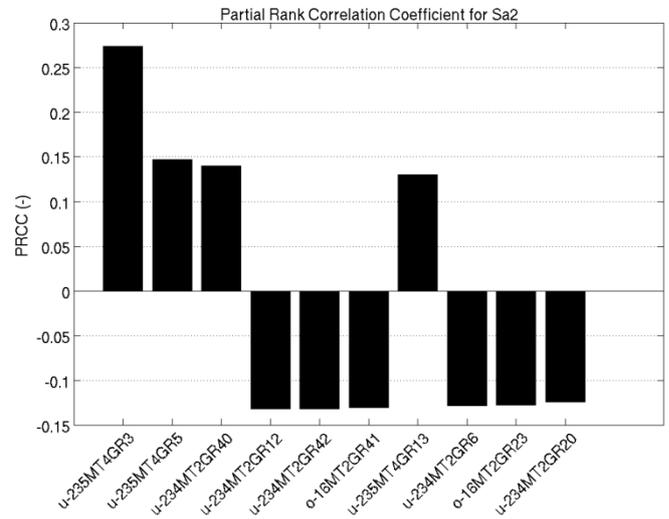
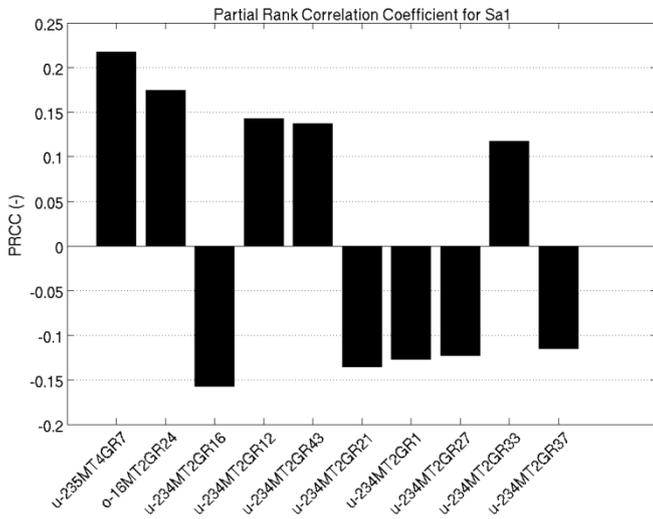


Figura 7: Coeficiente de correlación de rango parcial para la sección eficaz de absorción en función de los isótopos, reacciones nucleares y grupos de energía más sensitivos

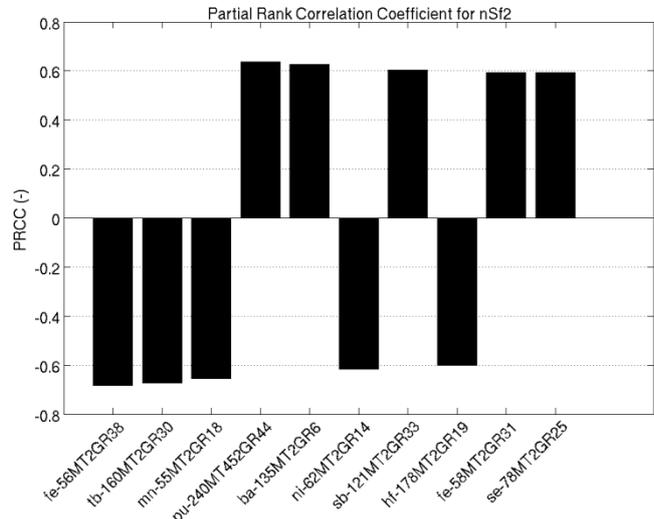
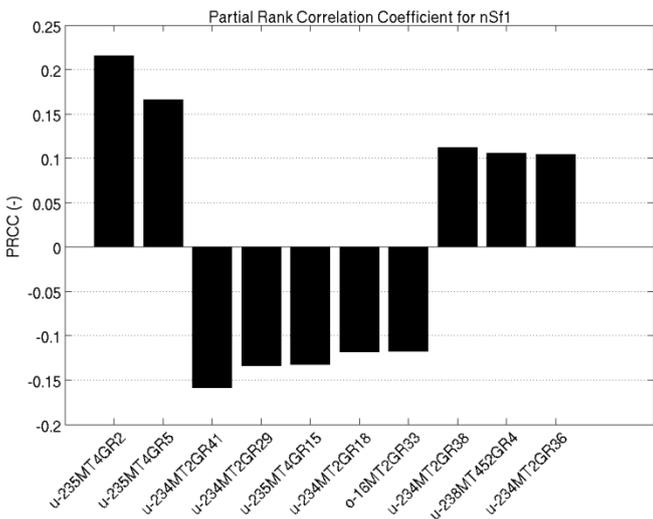


Figura 8: Coeficiente de correlación de rango parcial para la sección eficaz de fisión por v en función de los isótopos, reacciones nucleares y grupos de energía más sensitivos

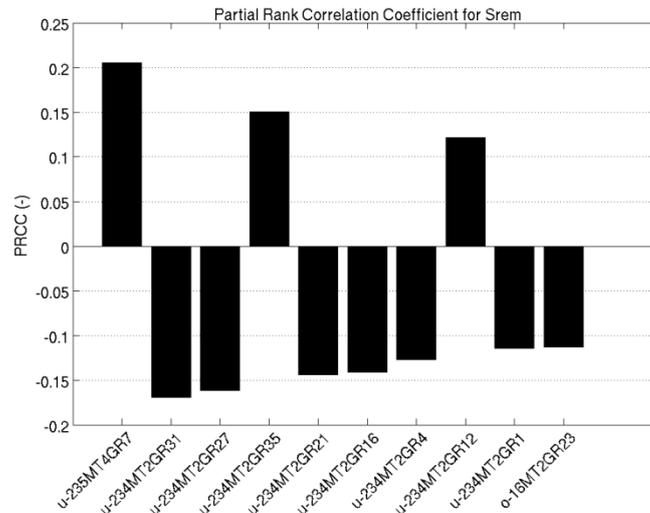


Figura 9: Coeficiente de correlación de rango parcial para la sección eficaz de remoción en función de los isótopos, reacciones nucleares y grupos de energía más sensitivos

Como se puede observar los parámetros de entrada más significativos son la producción de neutrones para el U-235 (MT=4) y la dispersión elástica para el U-234 (MT=2), seguido de más lejos de la difusión elástica para el O-16 y el número media de neutrones por fisión en el U-238. Sin embargo, resulta que para la sección eficaz de fisión del grupo 2 los isótopos más importantes son (para la dispersión elástica, MT=2) otros totalmente distintos (Hierro, Terbio, Manganeso...). Así mismo, los valores del PRCC para esta misma sección eficaz son muy altos (alrededor de 0.6), mientras que para las demás secciones eficaces, los PRCC mayores de 0.16 sólo son 2 o 3 por sección eficaz. Por último, los grupos de energía más significativos no parecen guardar una relación obvia.

4. CONCLUSIONES

En este trabajo se ha desarrollado y puesto en práctica dos metodologías distintas para el análisis de sensibilidad e incertidumbre durante la generación de librerías de secciones eficaces. Para ello se ha usado dos códigos distintos, el módulo SAMPLER (incluido en SCALE) y la herramienta DAKOTA. Con ellos se ha propagado la incertidumbre de las secciones eficaces contenidas en una librería máster y se ha obtenido la incertidumbre (y otros parámetros estadísticos) de las secciones eficaces contenidas en la librería generada. Además, con el estudio de sensibilidad se obtiene que combinación de isótopo, reacción nuclear y grupo de energía son más significativos para cada sección eficaz.

Con estos resultados, en un futuro trabajo, se continuará la propagación de la incertidumbre a través de un código TH-NK acoplado. Sin embargo, a diferencia de [14] se dispone de una ventaja ya que no se tendrá que recurrir a la opinión de un experto para determinar la PDF de las secciones eficaces (parámetros de entrada), sino que estas vienen ya dadas por el trabajo aquí presentado.

REFERENCIAS

- [1] Nuclear Energy Agency Organization for Economic Co-Operation and Development. 5th EURATOM Framework Programme. *Neutronics/Thermalhydraulics Coupling in LWR Technology, CRISSE-S WP2: State-of-the-art Report (REAC-SOAR)*. Vol. 2. OECD, NEA No. 5436, 2004.
- [2] Germina Ilas, Ian C. Gauld, Georgeta Radulescu. *Validation of new depletion capabilities and ENDF/B-VII data libraries in SCALE*. Annals of Nuclear Energy 46 (2012) 43–55.



- [3] M. A. Jesse y M. D. DeHart. *TRITON: A Multipurpose Transport, Depletion, and Sensitivity and Uncertainty Analysis Module*. Oak Ridge National Laboratory. Version 6.1, Sect T1. June 2011.
- [4] M. A. Jesse, M. D. DeHart. *NEWT: A new transport algorithm for two-dimensional discrete-ordinates analysis in non-orthogonal geometries*. Oak Ridge National Laboratory. Version 6.1, Sect F21. June 2011.
- [5] M. L. Williams et al. *SAMPLER: A Module for Statistical Uncertainty Analysis with SCALE Sequences*. SCALE 6.2 beta 1.
- [6] Sandia National Laboratories. *Dakota, a Multilevel Parallel Object-Oriented Framework for Design Optimization, Parameter Estimation, Uncertainty Quantification, and Sensitivity Analysis*. Version 5.4 User's Manual. SAND2010-2183, December 2009, Updated March 6, 2014.
- [7] M. L. Williams et al. *A statistical sampling method for uncertainty analysis with SCALE and XSUSA*. Oak Ridge National Laboratory.
- [8] *SCALE/TRITON Primer: A Primer for Light Water Reactor Lattice Physics Calculations*. NUREG/CR-7041. ORNL/TM-2011/21. Oak Ridge National Laboratory. November 2012.
- [9] C. Mesado, D. Morera, R. Miró, T. Barrachina, G. Verdú, Alberto Concejal, Amparo Soler, José Melara. *Comparison of Depletion Results for a Boiling Water Reactor Fuel Element with CASMO and SCALE 6.1 (TRITON/NEWT)*. International Nuclear Atlantic Conference INAC 2013 Recife, Brazil, ISBN: 978-85-99141-05-2.
- [10] C. Mesado, R. Miró, T. Barrachina, G. Verdú. *Secciones eficaces obtenidas de un modelado BWR con el código de quemado SCALE 6.2 y comparación con CASMO*. 40º Reunión anual Sociedad Nuclear Española (SNE), Valencia, España (2014). ISSN 1137-2885.
- [11] S. S. Wilks, *Mathematical statistics*, John Wiley & Sons, (1962).
- [12] In Seob Hong, Oh and Kim. *Generic Application of Wilk's Tolerance Limits Evaluation Approach to Nuclear Safety*. OECD/CSNI Workshop on Best Estimate Methods and Uncertainty Evaluations, Barcelona, 2011 November.
- [13] C. Mesado, R. Miró, T. Barrachina, G. Verdú. *Principales características y posibilidades del nuevo módulo de SCALE 6.2 para cálculo de sensibilidad e incertidumbre por muestreo: SAMPLER*. 40º Reunión anual Sociedad Nuclear Española (SNE), Valencia, España (2014). ISSN 1137-2885.
- [14] C. Mesado, A. Soler, T. Barrachina, R. Miró, J. C. García-Díaz, R. Macián-Juan, and G. Verdú. *Uncertainty and Sensitivity of Neutron Kinetic Parameters in the Dynamic Response of a PWR Rod Ejection Accident Coupled Simulation*. Hindawi Publishing Corporation. Science and Technology of Nuclear Installations. doi: 10.1155/2012/625878.
- [15] C. Mesado, M. Garcia-Fenoll, R. Miró, G. Verdú. *Control rod drop transient: uncertainty and sensitivity analysis of thermal-hydraulic variables using a 3D model with TRACE V5.0P3/PARCS 3.0*. 16th International Topical Meeting on Nuclear Reactor Thermalhydraulics (NURETH-16), Chicago (IL), USA (2015).