

Document downloaded from:

<http://hdl.handle.net/10251/61038>

This paper must be cited as:

Labarile, A.; Olmo Juan, N.; Miró Herrero, R.; Barrachina Celda, TM.; Verdú Martín, GJ. (2014). Participación en el Benchmark for Uncertainty Analysis in Modelling (UAM) for the Design, Operation and Safety Analysis of LWRs de la NEA. 40ª Reunión Anual de la Sociedad Nuclear Española. Grupo Senda.



The final publication is available at

<http://www.reunionanualsne.es/hemeroteca-ra/heme-ponencias>

Copyright Grupo Senda

Additional Information



Participación en el “Benchmark for Uncertainty Analysis in Modelling (UAM) for the Design, Operation and Safety Analysis of LWRs” de la NEA

Antonia Labarile, Nicolás Olmo, Rafael Miró, Teresa Barrachina, Gumersindo Verdú

Institute for Industrial, Radiophysical and Environmental Safety (ISIRYM)

Universitat Politècnica de València

Camí de Vera s/n, 46022, Valencia, Spain

alabarile@iqn.upv.es, nioljua@etsii.upv.es, rmiro@iqn.upv.es, tbarrachina@iqn.upv.es,
gverdu@iqn.upv.es

RESUMEN

En los últimos años ha habido una creciente demanda de la investigación nuclear y de su regulación para el desarrollo de metodologías y códigos que permitan lograr mejores predicciones y proporcionar los datos estimados con sus límites de confianza. Es por ello que se necesita profundizar sobre el Análisis de Sensibilidad e Incertidumbre de Modelos. El presente estudio, involucrado en el marco de investigación internacional de la OECD y NEA, realiza la estimación de los límites de confianza de resultados de simulaciones y efectúa análisis de sensibilidad e incertidumbres en casos reales de reactores de agua ligera (LWR).

El enfoque técnico es establecer puntos de referencia para el modelado de reactores LWR, utilizando como base problemas bien definidos de reactores de agua en ebullición (BWR) y reactores de agua a presión (PWR), a partir de definiciones de entrada y datos experimentales de referencia. Los objetivos son determinar y cuantificar las incertidumbres en todas las etapas de cálculo y propagar las incertidumbres en el sistema LWR en su conjunto. Los cálculos se llevan a cabo utilizando los programas SCALE 6.2beta3 (módulos TRITON/NEWT y TRITON/KENO-3D), así como el código de Monte Carlo SERPENT-2.1.22, para los cálculos de transporte.

La propagación de incertidumbres de secciones eficaces para un elemento combustible PWR 15×15 y otro BWR 7×7, en dos configuraciones diferentes (con y sin barras de control), y en dos diferentes estados, plena potencia (HFP) y potencia cero en caliente (HZP), se ha realizado utilizando los módulos TSUNAMI, que hace uso de la Teoría de Perturbaciones Generalizada (GPT) y SAMPLER que efectúa la perturbación mediante técnicas de muestreo estocástico de secciones eficaces. Se han perturbado los valores por flujo y para cada grupo de energía y finalmente se han calculado los coeficientes de sensibilidad discriminando los parámetros más sensibles e influyentes en los resultados de la k_{eff} y las secciones eficaces macroscópicas y microscópicas perturbadas. Los resultados obtenidos y validados se comparan con los resultados de referencias y estudios análogos presentados en los ejercicios I-1 (celda de combustible) y I-2 (elemento combustible) del UAM-Benchmark.

1. INTRODUCCIÓN

Este trabajo participa en el marco de referencia del Benchmark de la OECD/NEA para el Análisis de Incertidumbres en el Modelado (*Uncertainty Analysis in Modelling, UAM*) para el Diseño, Operación y Análisis de Seguridad de reactores de agua ligera. El proyecto se puso en marcha en 2005 con el objetivo de preparar un programa de "Benchmark" con etapas (ejercicios) necesarios para definir las tareas de modelado y sus incertidumbres, para el desarrollo de metodologías de análisis de incertidumbres de simulaciones multifísicas y multiescala. El objetivo final será crear una hoja de ruta junto a un cronograma, para el desarrollo y validación de métodos y códigos necesarios para el análisis de seguridad e incertidumbre en el diseño de reactores de agua ligera [1].

La organización del Benchmark OECD/NEA proporciona a los participantes las especificaciones de entrada y los datos experimentales de referencia, para el modelado de diferentes sistemas de reactores. El marco general de la "OECD UAM LWR Benchmark" consta de tres fases, siendo la Fase-1 "Fase Neutrónica", Fase-2 "Fase de Núcleo" y la Fase 3 "Fase de Sistema". Con diferentes ejercicios para cada fase. En particular, la Fase-1 "Fase Neutrónica" consta de tres ejercicios:

- Ejercicio I-1: "Física de Celda" centrado en la obtención de las librerías de secciones eficaces microscópicas multigrupo.
- Ejercicio I-2: "Física de Elemento" centrado en la obtención de las librerías de secciones eficaces macroscópicas multigrupo.
- Ejercicio I-3: "Física de núcleo" centrado en los principales cálculos neutrónicos del reactor en estado estacionario, sin acoplamiento.

El presente trabajo trata sólo con los ejercicios *Física de Celda* y *Física de Elemento*, determinando las incertidumbres asociadas a los datos iniciales, metodologías y aproximaciones en el modelado, utilizados en los códigos de física de Elemento.

2. DESCRIPCIÓN DEL CÓDIGO

En este trabajo, dos códigos de Elemento (uno determinista 2-D y otro estocástico 3-D) han sido seleccionados para realizar los cálculos de transporte y el estudio de incertidumbres: TRITON/NEWT y SERPENT-2.

TRITON ("*Transport Rigor Implemented with Time-dependent Operation for Neutronics depletion*") es un módulo de control de SCALE para el transporte, el quemado, y el análisis de la sensibilidad e incertidumbre para aplicaciones en física de reactor. TRITON se utiliza para proporcionar de forma automatizada, la generación de secciones eficaces seguido por el cálculo del transporte de neutrones multigrupo, en una, dos o tres dimensiones [2].

NEWT ("*New ESC-based Weighting Transport code*") es un código de transporte bidimensional en ordenadas discretas desarrollado en el Oak Ridge National Laboratory. Se basa en el enfoque de las características de paso extendido (ESC) para la discretización espacial en una estructura de malla arbitraria. Este esquema de discretización convierte a NEWT en una herramienta extremadamente potente y versátil para el cálculo determinista en los problemas de dominio reales no ortogonal. El código informático NEWT ha sido desarrollado para funcionar dentro de SCALE. Por lo tanto, NEWT utiliza secciones eficaces con formato AMPX procesados por otros módulos del SCALE [3].

Además de este estudio, se empleó un módulo funcional de Monte Carlo en KENO que permite obtener representaciones geométricas en 3D para los cálculos de k_{eff} y de secciones eficaces. El código KENO fue una de las primeras herramientas de análisis de riesgo de criticidad implementadas en el SCALE [4].

El código SERPENT es un código de Monte Carlo de energía continua tridimensional para el estudio de la física del reactor [5], se encuentra en fase de desarrollo en el Centro de Investigación Técnica VTT de Finlandia desde 2004. Las aplicaciones sugeridas de SERPENT incluyen, entre otras aplicaciones, la homogeneización espacial y la generación de constantes de grupo para la simulación de cálculos de reactor deterministas y la validación de los códigos de transporte de malla deterministas.

El análisis de sensibilidad y la propagación de las incertidumbres de secciones eficaces se han llevado a cabo utilizando los módulos de TSUNAMI y SAMPLER.

TSUNAMI-2D (*“Tools for Sensitivity and Uncertainty Analysis Methodology Implementation in Two Dimension”*) es un módulo de control del SCALE que facilita la aplicación del análisis de sensibilidad e incertidumbre a los sistemas nucleares para aplicaciones de seguridad y de criticidad. TSUNAMI utiliza la Teoría de Perturbación Generalizada (GTP). El módulo SAMS se utiliza para determinar las sensibilidades del valor de la k_{eff} y otras respuestas del sistema a los datos nucleares [6].

SAMPLER es un módulo para el análisis de incertidumbres, mediante muestreo estocástico, de cualquier secuencia del SCALE ya que el método de cálculo de transporte es independiente de los análisis S&U. SAMPLER genera perturbaciones aleatorias en los datos de entrada y la incertidumbre de respuesta se calcula mediante un análisis estadístico de la distribución de respuesta de salida [7].

3. DESCRIPCIÓN DEL MODELO

En el presente estudio se han seleccionado dos tipos de reactores de agua ligera, basados en los datos de referencia disponibles en el UAM-Benchmark:

- Reactor de agua en ebullición (BWR) *Peach Bottom 2* (PB-2).
- Reactor de agua a presión (PWR) *Three Mile Island 1* (TMI-1).

Ambos modelos han sido analizados en dos diferentes estados, a plena potencia (HFP) y a potencia cero en caliente (HZP). Además, los dos modelos se han diseñado en dos diferentes configuraciones, con y sin barras de control.

Las diferentes geometrías de celda combustible y sus configuraciones de referencia se sintetizan a continuación, en la Figura 1 y en la Figura 2:

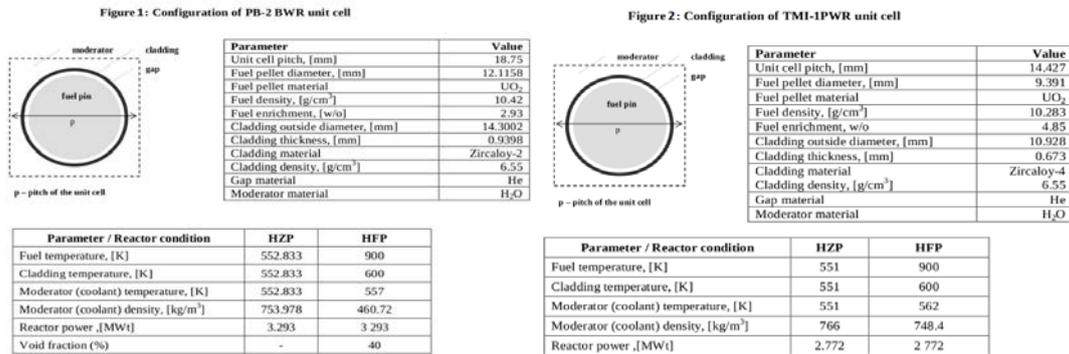


Figura 1: Configuración de celda del BWR y Figura 2: Configuración de celda del PWR.

La propagación de las incertidumbres de las secciones eficaces a través de la física de elemento es el propósito principal de este ejercicio. Para hacerlo, se ha definido un diseño de elemento combustible en el UAM-Benchmark para cada uno de los modelos estudiados [8]. Estos elementos combustibles (BWR y PWR) se muestran en la Figura 3 y Figura 4, mientras que la Tabla 1 muestra los datos de estos dos elementos.

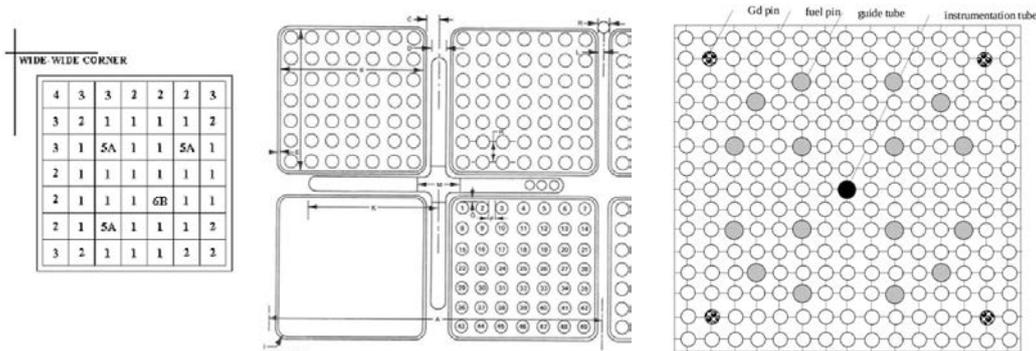


Figura 3: diseño del elemento combustible PB-2 BWR y Figura 4: diseño del elemento combustible TMI-1 PWR.

Tabla 1: datos del elemento combustible para el Ejercicio I-2.

TABLE 1: Pin-cell data for the test cases of Exercises I- 2.

Parameter	BWR	PWR
FA geometry	7 × 7	15 × 15
FA pitch (mm)	152.4	218.11
Fuel rods per assembly	49	208
Number of guide tubes per FA	—	16
Number of instrumentation tubes per FA	—	1
Number of Gd pins per FA	4	4
Guide tube outside diameter (mm)	—	13.462
Guide tube inside diameter (mm)	—	12.649
Instrumentation tube outside diameter (mm)	—	12.522
Instrumentation tube inside diameter (mm)	—	11.201

Como resultado de la implementación los dos elementos combustibles en TRITON/NEWT para el cálculo del transporte, se han obtenido los diseños 2-D de las cuatro configuraciones que se muestran a continuación, en la Figura 5 y Figura 6:

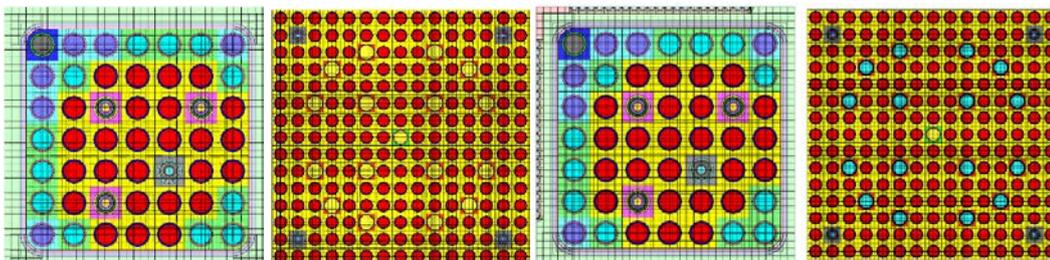


Figura 5: diseño de los elementos combustibles sin barras de control y Figura 6: diseño de los elementos combustibles con barras de control.

Existen diferentes metodologías utilizadas en los cálculos de este trabajo. Estos métodos abarcan desde el enfoque determinista (TRITON/NEWT) al método Monte Carlo (KENO y SERPENT), desde la Teoría de la Perturbación Generalizada (TSUNAMI) a las técnicas de muestreo estocástico (SAMPLER).

4. RESULTADOS

En esta sección se presentan los resultados del cálculo del transporte con TRITON/NEWT, SERPENT-2 y KENO-3D, así como los resultados del análisis de sensibilidad y propagación de incertidumbres realizados con el TSUNAMI y el módulo SAMPLER. Todos los cálculos se han llevado a cabo para los cuatro modelos de elemento combustible (como se muestran en la Figura 5 y 6) y con dos diferentes estados, plena potencia (HFP) y parada en caliente (HZP), con un total de ocho configuraciones para el Ejercicio I-2 del UAM-Benchmark.

4.1. Resultados de TRITON/NEWT y SERPENT-2

Los valores resultantes de k_{eff} y secciones eficaces se resumen en la Tabla 2 y la Tabla 3. Todas las tablas muestran la comparación entre TRITON/NEWT y SERPENT-2.1.22, este último se ha ejecutado con ambas librerías JEFF y ENDFB, con el fin de comparar los resultados con SCALE (librería ENDFB). La primera columna muestra los valores de salida comparados en este trabajo, la segunda los valores de referencia del UAM-Benchmark. La tercera y cuarta columna representan los cálculos TRITON/NEWT (valores obtenidos con 238 grupos de energía y colapsados a dos grupos) y su error respecto a los valores del UAM-Benchmark. Seguidamente, se presentan los resultados de los cálculos con SERPENT-2 y su comparación con TRITON/NEWT y valores de referencia UAM-Benchmark.

Tabla 2: Comparación de los resultados de las secciones eficaces en el ejercicio I-2 Benchmark, en la configuración PWR.

	output	BENCHMARK	TRITON	Error (%)	SERPENT (jeff)	Error (%)	SERPENT vs SCALE	SERPENT (ENDFB)	Error (%)	SERPENT vs SCALE
PWR_HFP_unrodged	k_assembly	1.398	1.3939E+00	0.29685	1.3871E+00	0.77682	0.48374	1.3866E+00	0.81543	0.52287
	fuel_maca_1	1.04E-02	1.0773E-02	3.59327	1.0159E-02	2.31635	6.03952	1.0161E-02	2.29615	6.01760
	fuel_maca_2	0.109	1.0985E-01	0.77687	1.1092E-01	1.76055	0.96666	1.1114E-01	1.95963	1.16003
	fuel_macf_1	3.53E-03	3.6129E-03	2.34899	3.4593E-03	2.00340	4.44137	3.4591E-03	2.00992	4.44832
	fuel_macf_2	7.72E-02	7.8479E-02	1.65734	7.9098E-02	2.45907	0.78248	7.9255E-02	2.66218	0.97878
	fuel_macto_1	0.552	5.5888E-01	1.24595	5.3959E-01	2.24909	3.57546	5.3953E-01	2.25996	3.58698
	fuel_macto_2	1.412	1.4017E+00	0.73039	1.3757E+00	2.56941	1.88751	1.3628E+00	3.48584	2.85497
	diff_1	1.423	1.4296E+00	0.46517	1.3523E+00	4.96557	5.71449	1.3528E+00	4.93355	5.68089
	diff_2	0.364	3.6233E-01	0.45838	4.0804E-01	12.09945	11.20240	4.1194E-01	13.16896	12.04158
	nu_fis_1	8.98E-03	9.1138E-03	1.48984	8.7559E-03	2.49588	4.08775	8.7555E-03	2.49989	4.09203
	nu_fis_2	0.189	1.9123E-01	1.18025	1.9274E-01	1.97831	0.78258	1.9312E-01	2.18042	0.97883
	flux_1	3.62E+01	7.6822E-02	99.78778	8.8083E-01	97.56677	91.27841	8.8108E-01	97.56607	91.28090
	flux_2	5.66E+00	1.1905E-02	99.78967	1.1919E-01	97.89422	90.01178	1.1894E-01	97.89866	89.99071
	inv_velo_1	5.45E-08	5.6169E-08	3.06202	5.1721E-08	5.09908	8.59960	5.1721E-08	5.09872	8.59918
inv_velo_2	2.41E-06	2.3943E-06	0.65098	2.4142E-06	0.17261	0.82217	2.4181E-06	0.33485	0.98254	
PWR_HZP_unrodged	k_assembly	1.413	1.4106E+00	0.16662	1.4041E+00	0.62845	0.46476	1.4044E+00	0.61146	0.44759
	fuel_maca_1	1.05E-02	1.0600E-02	0.95070	9.9757E-03	4.99343	6.25655	9.9781E-03	4.97038	6.23078
	fuel_maca_2	0.111	1.1110E-01	0.09358	1.1271E-01	1.53874	1.42326	1.1307E-01	1.86667	1.74059
	fuel_macf_1	3.55E-03	3.6240E-03	2.08454	3.4661E-03	2.36225	4.55438	3.4651E-03	2.39211	4.58637
	fuel_macf_2	7.87E-02	7.9327E-02	0.79680	8.0407E-02	2.16938	1.34343	8.0675E-02	2.50902	1.67031
	fuel_macto_1	0.56	5.6750E-01	1.39909	5.4785E-01	2.16893	3.58580	5.4771E-01	2.19500	3.61341
	fuel_macto_2	1.409	1.4356E+00	1.88983	1.4011E+00	0.57784	2.46140	1.3883E+00	1.46984	3.40978
	diff_1	1.371	1.4161E+00	3.29312	1.3355E+00	2.59154	6.04122	1.3356E+00	2.58060	6.02931
	diff_2	0.348	3.5416E-01	1.77037	4.0251E-01	15.66322	12.01147	4.0627E-01	16.74310	12.82537
	nu_fis_1	8.99E-03	9.1420E-03	1.69080	8.7744E-03	2.39800	4.18926	8.7720E-03	2.42547	4.21859
	nu_fis_2	0.192	1.9330E-01	0.67505	1.9593E-01	2.04583	1.34330	1.9658E-01	2.38542	1.67052
	flux_1	3.03E+01	4.1149E-02	99.86419	8.7916E-01	97.09848	95.31951	8.7954E-01	97.09723	95.32152
	flux_2	5.047	9.5885E-01	81.00157	1.2086E-01	97.60541	693.38953	1.2048E-01	97.61288	695.87221
	inv_velo_1	5.36E-08	5.6735E-08	5.84935	5.2050E-08	2.89198	9.00165	5.2010E-08	2.96660	9.08548
inv_velo_2	2.40E-06	2.4209E-06	0.87263	2.4560E-06	2.33375	1.42780	2.4625E-06	2.60458	1.68799	
PWR_HFP_rodged	k_assembly	1.065	1.0248E+00	3.77449	1.0113E+00	5.04225	1.33509	1.0120E+00	4.98028	1.26900
	fuel_maca_1	1.29E-02	1.3558E-02	5.10058	1.3598E-02	5.41085	0.29434	1.3603E-02	5.44574	0.32733
	fuel_maca_2	0.135	1.4025E-01	3.89123	1.4209E-01	5.25481	1.29551	1.4236E-01	5.45481	1.48271
	fuel_macf_1	3.42E-03	3.4784E-03	1.70812	3.4265E-03	0.19035	1.51489	3.4266E-03	0.19386	1.51134
	fuel_macf_2	7.89E-02	8.0493E-02	2.01845	8.1212E-02	2.93004	0.88564	8.1379E-02	3.14144	1.08879
	fuel_macto_1	0.554	5.4996E-01	0.72874	5.3624E-01	3.20632	2.55964	5.3620E-01	3.21372	2.56749
	fuel_macto_2	1.4	1.3678E+00	2.30283	1.3391E+00	4.35071	2.14104	1.3277E+00	5.16500	3.01806
	diff_1	1.43	1.3931E+00	2.58350	1.3731E+00	3.97972	1.45409	1.3732E+00	3.97552	1.44965
	diff_2	0.361	3.6595E-01	1.37097	4.2072E-01	16.54183	13.01753	4.2420E-01	17.50693	13.73192
	nu_fis_1	8.63E-03	8.7780E-03	1.71477	8.6631E-03	0.38401	1.32567	8.6638E-03	0.39212	1.31748
	nu_fis_2	0.192	1.9614E-01	2.15410	1.9789E-01	3.06719	0.88591	1.9830E-01	3.27865	1.08884
	flux_1	9.83E-02	7.6528E-03	91.31706	9.1473E-01	1.43120	91.43788	9.1484E-01	1.42339	91.43891
	flux_2	9.83E-02	7.6528E-03	92.21487	8.5288E-02	13.23713	91.02712	8.5178E-02	13.34914	91.01552
	inv_velo_1	5.07E-08	4.9662E-08	2.04658	4.8640E-08	4.06312	2.10195	4.8641E-08	4.06036	2.09901
inv_velo_2	2.33E-06	2.3001E-06	1.28301	2.3162E-06	0.59399	0.69313	2.3206E-06	0.40215	0.88442	
PWR_HZP_rodged	k_assembly	1.095	1.0404E+00	4.98526	1.0373E+00	5.26575	0.29608	1.0374E+00	5.26210	0.29221
	fuel_maca_1	1.28E-02	1.3422E-02	4.85789	1.3135E-02	2.61406	2.18666	1.3136E-02	2.62500	2.17577
	fuel_maca_2	0.136	1.4151E-01	4.05237	1.4528E-01	6.82500	2.59549	1.4575E-01	7.17206	2.91092
	fuel_macf_1	3.43E-03	3.4930E-03	1.83764	3.4420E-03	0.34985	1.48260	3.4435E-03	0.39417	1.43780
	fuel_macf_2	7.97E-02	8.1394E-02	2.12570	8.2838E-02	3.93714	1.74282	8.3066E-02	4.22371	2.01299
	fuel_macto_1	0.211	5.5801E-01	164.46030	5.4371E-01	157.68294	2.63012	5.4369E-01	157.67204	2.63446
	fuel_macto_2	1.65	1.3992E+00	15.20185	1.3667E+00	17.16970	2.37576	1.3558E+00	17.83273	3.20185
	diff_1	1.406	1.3811E+00	1.77105	1.3561E+00	3.55050	1.84496	1.3561E+00	3.54765	1.84195
	diff_2	0.355	3.5832E-01	0.93640	4.1414E-01	16.65831	13.47689	4.1760E-01	17.63268	14.19357
	nu_fis_1	7.50E+00	8.8148E-03	99.88247	8.7014E-03	99.88398	1.30356	8.7049E-03	99.88394	1.26341
	nu_fis_2	1.053	1.9833E-01	81.16497	2.0185E-01	80.83086	1.74292	2.0241E-01	80.77797	2.01331
	flux_1	0.902	7.7124E-02	91.44962	9.1278E-01	1.19534	91.55062	9.1301E-01	1.22095	91.55276
	flux_2	9.82E-02	7.736E-03	92.08393	8.7235E-02	11.16578	91.08894	8.7005E-02	11.40051	91.06533
	inv_velo_1	5.10E-08	5.0307E-08	1.35804	4.9600E-08	2.74588	1.42703	4.9619E-08	2.70706	1.38655
inv_velo_2	2.34E-06	2.3253E-06	0.62885	2.3565E-06	0.70513	1.32464	2.3632E-06	0.99143	1.60440	

En la Tabla 2 se destaca una buena correspondencia entre los valores de referencia y los resultados de TRITON/NEWT. La única discrepancia recurrente es el valor del flujo (en ambos grupos de energía), pero se puede justificar teniendo en cuenta que si normalizamos el flujo rápido y térmico de tal manera que sumen uno, entonces los resultados concuerdan bien con los resultados de referencia UAM-Benchmark. Por otra parte, la comparación de los resultados de SERPENT-2.1.22 con TRITON/NEWT y UAM-Benchmark, muestra que los valores no se ajustan del todo, para la configuración PWR, y esto es tal vez, por la diferente metodología (Monte Carlo) implementada en el código SERPENT. Además, comparando las librerías JEFF y ENDFB, los resultados obtenidos con JEFF son más parecidos a los valores UAM-Benchmark y TRITON. Por tanto, teniendo en cuenta que SERPENT es un código en fase de desarrollo (el

proyecto inició en 2008) y que posee menores tiempos de computación para el cálculo del transporte, pese a no ser totalmente preciso en este ejercicio considerado las discrepancias con los resultados validados y de referencia, podría ser un buen código para el cálculo del transporte.

Tabla 3: Comparación de los resultados de secciones eficaces en el ejercicio I-2 Benchmark, en la configuración BWR.

	output	BENCHMARK	TRITON	Error (%)	SERPENT (jeff)	Error (%)	SERPENT vs SCALE	SERPENT (ENDFB)	Error (%)	SERPENT vs SCALE
BWR_HFP_unrodded	k_assembly	1.076	1.0801E+00	0.38391	1.0808E+00	0.44238	0.05822	1.0810E+00	0.46468	0.08041
	fuel_maca_1	6.88E-03	6.9344E-03	0.79044	6.8478E-03	0.46773	1.26409	6.8471E-03	0.47820	1.27474
	fuel_maca_2	5.25E-02	5.1964E-02	1.02056	5.2848E-02	0.66343	1.67289	5.3041E-02	1.03029	2.02993
	fuel_macf_1	1.78E-03	1.8168E-03	2.06885	1.8179E-03	2.13146	0.06130	1.8183E-03	2.15337	0.08274
	fuel_macf_2	2.61E-02	2.7079E-02	3.74979	2.7606E-02	5.77165	1.91153	2.7704E-02	6.14598	2.25744
	fuel_macto_1	0.415	4.6371E-01	11.73712	4.5001E-01	8.43687	3.04348	4.4996E-01	8.42361	3.05608
	fuel_macto_2	0.995	1.2365E+00	24.27597	1.1885E+00	19.45025	4.03994	1.1738E+00	17.96985	5.34554
	diff_1	1.768	1.6446E+00	6.98132	1.6111E+00	8.87670	2.08001	1.6114E+00	8.85747	2.05847
	diff_2	0.426	4.1171E-01	3.35417	4.5674E-01	7.21549	9.85834	4.6257E-01	8.58333	10.99387
	nu_fis_1	4.70E-03	4.6593E-03	0.86542	4.6735E-03	0.56383	0.30330	4.6745E-03	0.54319	0.32399
	nu_fis_2	0.066	6.5983E-02	0.02640	6.7269E-02	1.92212	1.91178	6.7507E-02	2.28288	2.25774
	flux_1	0.214	1.9668E-01	8.09441	7.9053E-01	269.40607	75.12072	7.9112E-01	269.67991	75.13915
	flux_2	0.053	5.6608E-02	6.80800	2.0949E-01	295.26038	72.97781	2.0890E-01	294.15472	72.90201
	inv_velo_1	5.89E-08	5.9537E-08	1.08074	5.7933E-08	1.64160	2.76777	5.7939E-08	1.63243	2.75819
inv_velo_2	2.57E-06	2.6004E-06	1.18298	2.6420E-06	2.80195	1.57484	2.6444E-06	2.89494	1.66379	
BWR_HZP_unrodded	k_assembly	1.108	1.1057E+00	0.20373	1.1072E+00	0.07040	0.13343	1.1075E+00	0.04242	0.16138
	fuel_maca_1	7.15E-03	7.2009E-03	0.71133	7.0982E-03	0.72462	1.44642	7.0978E-03	0.73077	1.45271
	fuel_maca_2	5.46E-02	5.5418E-02	1.49737	5.6209E-02	2.94670	1.40785	5.6460E-02	3.40733	1.84702
	fuel_macf_1	1.90E-03	1.9089E-03	0.46727	1.9122E-03	0.63947	0.17111	1.9120E-03	0.62947	0.16118
	fuel_macf_2	2.91E-02	2.8520E-02	1.99236	2.8941E-02	0.54708	1.45323	2.9071E-02	0.09863	1.89560
	fuel_macto_1	0.564	5.0805E-01	0.71715	5.5776E-01	1.10874	1.84491	5.5760E-01	1.13422	1.15422
	fuel_macto_2	1.519	1.5105E+00	0.55929	1.4825E+00	2.40290	1.88900	1.4636E+00	3.64648	3.20402
	diff_1	1.496	1.4550E+00	2.74083	1.3872E+00	7.27206	4.88658	1.3875E+00	7.25000	4.86164
	diff_2	0.332	3.3665E-01	1.40130	3.6458E-01	9.81265	7.65973	3.6956E-01	11.31386	8.90505
	nu_fis_1	4.84E-03	4.9048E-03	1.33844	4.9255E-03	1.76736	0.42147	4.9254E-03	1.76384	0.41803
	nu_fis_2	6.78E-02	6.9495E-02	2.50022	7.0520E-02	4.01180	1.45328	7.0838E-02	4.48083	1.89566
	flux_1	0.154	1.5453E-01	0.34204	7.4110E-01	381.23182	79.14892	7.4196E-01	381.79416	79.17326
	flux_2	5.61E-02	5.7612E-02	2.69581	2.5892E-01	361.53832	77.74923	2.5806E-01	359.99465	77.67456
	inv_velo_1	6.14E-08	6.2061E-08	1.07716	6.0275E-08	1.83241	2.96388	6.0273E-08	1.83583	2.96747
inv_velo_2	2.67E-06	2.6699E-06	0.00308	2.7313E-06	2.29551	2.24700	2.7340E-06	2.39588	2.34282	
BWR_HFP_rodded	k_assembly	0.787	7.6885E-01	2.30603	7.9570E-01	1.10572	3.37443	7.9499E-01	1.01525	3.28789
	fuel_maca_1	9.53E-03	9.1215E-03	4.28691	9.6968E-03	1.75005	5.93313	9.6980E-03	1.76296	5.94506
	fuel_maca_2	7.10E-02	7.3340E-02	3.29585	7.2099E-02	1.54746	1.72174	7.2319E-02	1.85817	1.41145
	fuel_macf_1	1.83E-03	1.7498E-03	4.38208	1.8165E-03	0.73934	3.66987	1.8169E-03	0.71585	3.69266
	fuel_macf_2	3.07E-02	3.0966E-02	0.86765	3.0841E-02	0.45798	0.40780	3.0916E-02	0.70195	0.16454
	fuel_macto_1	0.418	4.1206E-01	1.42017	4.5084E-01	7.85694	8.60131	4.5082E-01	7.85191	8.59705
	fuel_macto_2	0.829	9.3549E-01	12.84558	1.1015E+00	32.87214	15.07205	1.0900E+00	31.48010	14.17288
	diff_1	1.713	1.6981E+00	0.86844	1.6026E+00	6.44308	5.95855	1.6029E+00	6.42790	5.94137
	diff_2	0.468	5.1950E-01	11.00527	4.8921E-01	4.53120	6.19344	4.9446E-01	5.65299	5.06590
	nu_fis_1	4.61E-03	4.4789E-03	2.84428	4.6622E-03	1.13210	3.93187	4.6631E-03	1.15141	3.95020
	nu_fis_2	7.43E-02	7.5456E-02	1.55539	7.5149E-02	1.14307	0.40767	7.5332E-02	1.38883	0.16428
	flux_1	2.12E-01	2.2824E-01	7.65875	8.5454E-01	303.08349	73.29120	8.5503E-01	303.31368	73.30645
	flux_2	3.18E-02	3.0360E-02	4.65529	1.8505E-01	357.53774	79.16140	1.4501E-01	356.00943	79.09156
	inv_velo_1	5.20E-08	5.2489E-08	0.94027	5.5013E-08	5.79442	4.58828	5.5010E-08	5.78769	4.58221
inv_velo_2	2.47E-06	2.4240E-06	1.86296	2.5319E-06	2.50729	4.26336	2.5354E-06	2.64737	4.39401	
BWR_HZP_rodded	k_assembly	0.862	8.5742E-01	0.53117	8.6665E-01	0.53956	1.06499	8.6622E-01	0.48933	1.01553
	fuel_maca_1	9.79E-03	9.5029E-03	2.93214	9.9015E-03	1.13882	4.02512	9.8979E-03	1.10174	3.98992
	fuel_maca_2	7.41E-02	7.6223E-02	2.86503	7.5900E-02	2.42888	0.42581	7.6194E-02	2.82524	0.03870
	fuel_macf_1	1.97E-03	1.9048E-03	3.30803	1.9321E-03	1.92284	1.41326	1.9324E-03	1.90014	1.42703
	fuel_macf_2	3.18E-02	3.2487E-02	2.16014	3.3134E-02	4.19560	1.95350	3.3228E-02	4.49151	2.23116
	fuel_macto_1	0.579	5.6234E-01	2.87822	5.5914E-01	3.43057	0.57198	5.5901E-01	3.45285	0.59519
	fuel_macto_2	1.557	1.4526E+00	6.70639	1.4237E+00	8.56455	2.03221	1.4076E+00	9.59281	3.19269
	diff_1	1.466	1.4293E+00	2.50143	1.3873E+00	5.37108	3.03253	1.3878E+00	5.33561	2.99392
	diff_2	0.339	3.4671E-01	2.27327	3.8032E-01	12.18879	8.83824	3.8481E-01	13.51445	9.90286
	nu_fis_1	4.97E-03	4.8933E-03	1.54374	4.9709E-03	0.01710	1.56058	4.9714E-03	0.02716	1.57048
	nu_fis_2	7.89E-02	7.9161E-02	0.33054	8.0738E-02	2.32960	1.95361	8.0967E-02	2.62015	2.23115
	flux_1	0.154	1.5664E-01	1.71227	8.0694E-01	423.98377	80.58866	8.0745E-01	424.31688	80.60099
	flux_2	3.78E-02	3.6956E-02	2.23209	1.9310E-01	410.85450	80.86189	1.9259E-01	409.48677	80.81051
	inv_velo_1	5.81E-08	5.7634E-08	0.80268	5.8093E-08	0.01188	0.79089	5.8088E-08	0.01997	0.78287
inv_velo_2	2.60E-06	2.5839E-06	0.61863	2.6442E-06	1.70077	2.28061	2.6476E-06	1.83154	2.40610	

La Tabla 3 muestra una buena correspondencia entre los valores de referencia y TRITON/NEWT como se presentaba también en la Tabla 2, a excepción de los valores del flujo rápido y térmico, que se ha explicado anteriormente. Al comparar los resultados de SERPENT-2 con los de TRITON/NEWT y UAM-Benchmark, se deduce un comportamiento similar al obtenido en la configuración PWR de la Tabla 2. Es importante destacar que a pesar del diferente enfoque utilizado en el código SERPENT, existe un comportamiento aceptable entre este y SCALE y los valores de referencia. También en este caso, los resultados de la librería JEFF son ligeramente mejores en comparación con la librería ENDFB. Como conclusión, es importante dar relevancia a los menores tiempos de computación en el cálculo del transporte de este código que ha resultado ser más rápido que el código SCALE para estos ejercicios.

4.2. Resultados de KENO 3-D

En las siguientes secciones de resultados se presenta sólo una de las ocho configuraciones estudiadas, concretamente la PWR-HFP-unrodded. Esto es a fin de ejemplo, por razones de espacio limitado para este artículo. Sin embargo, las ocho configuraciones han sido calculadas y los resultados se han analizado con el fin de participar en el UAM-Benchmark ejercicio I-2 “Física de Elemento”.

A partir del cálculo en KENO-3D, la mejor estimación de K_{eff} ha sido $1,40031 \pm 0,00036$.

Además, la figura 7 muestra el promedio de la k_{eff} por generaciones y la frecuencia de k_{eff} para cada generación obtenida en el cálculo KENO-3D.

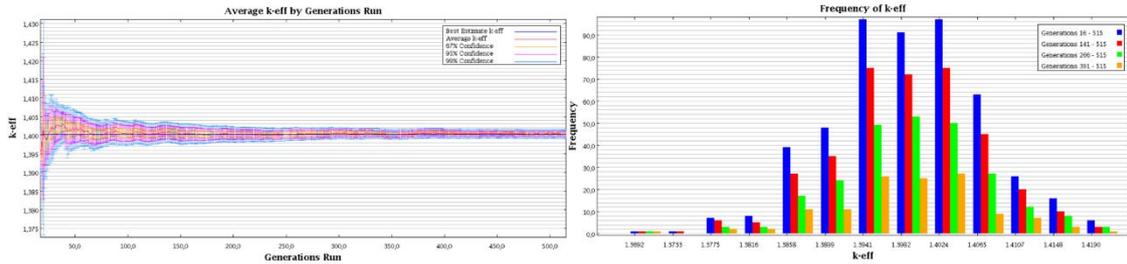


Figura 7: promedio de k_{eff} por generaciones y frecuencia de k_{eff} para cada generación.

4.3. Resultados de TSUNAMI 2-D

El Módulo TSUNAMI es muy útil para el análisis de sensibilidad y propagación de incertidumbres de las secciones eficaces. Recurriendo a la Teoría de Perturbaciones Generalizadas (GTP), determina los coeficientes de sensibilidad para la reacción total, para cada nucleído y composición, es decir, la sensibilidad de k_{eff} .

Con el fin de presentar las respuestas del sistema, en la Figura 8 se encuentra la lista de los ocho principales contribuyentes en la incertidumbre de k_{eff} por matrices de covarianza de energía individuales, para el caso PWR-HFP-unrodded. En la Figura 10 se muestran los perfiles de sensibilidad de los resultados de este cálculo. Otros resultados se presentan a continuación:

Forward calculation: $k_{eff} = 1.39405262$; Adjoint calculation: $k_{eff} = 1.39403963$; Desviación estándar de k_{eff} debido a los datos de covarianza de las secciones eficaces = 0.4713 % $\Delta k/k$.

Covariance Matrix		Contributions to Uncertainty in k_{eff} (% $\Delta k/k$)
Nuclide-Reaction	Nuclide-Reaction	Due to this Matrix
^{235}U mbar	^{235}U mbar	2.6798E-01
^{238}U n, gamma	^{238}U n, gamma	2.5618E-01
^{235}U n, gamma	^{235}U n, gamma	2.0147E-01
^{235}U fission	^{235}U n, gamma	1.0809E-01
^{238}U n, n'	^{238}U n, n'	9.9236E-02
^{235}U chi	^{235}U chi	8.8598E-02
^{235}U fission	^{235}U fission	8.4098E-02
^{238}U mbar	^{238}U mbar	6.4891E-02

Figura 8: mayores contribuyentes en la incertidumbre de k_{eff} (% $\Delta k/k$).

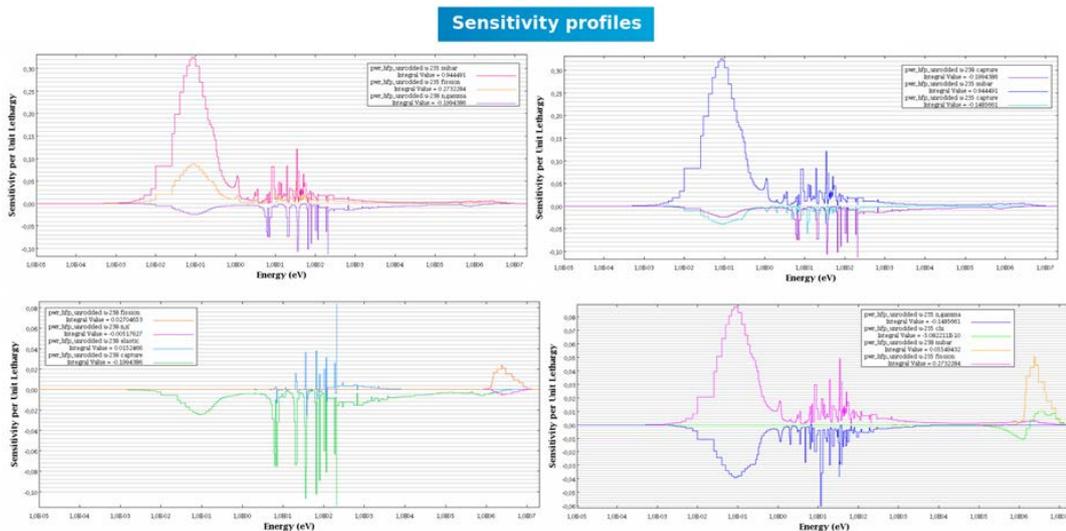


Figura 9: perfiles de sensibilidad de los mayores contribuyentes en la incertidumbre de k_{eff} .

4.4. Resultados de SAMPLER

El módulo SAMPLER proporciona un conjunto de matrices para la cuantificación de las incertidumbres. Un ejemplo de estas tablas se presenta a continuación.

Tabla 4: matriz de correlación, matriz de covarianza, valores medios y desviación estándar sobre la población muestreada de la configuración PWR-HFP-unrodded.

(CORR-1)	kinf	flux_g1_m1	flux_g2_m1	diffusion_g1_m1	diffusion_g2_m1	sigma_fission_g1_m1	sigma_fission_g2_m1	sigma_transport_g1_m1	sigma_transport_g2_m1	sigma_total_g1_m1	sigma_total_g2_m1
kinf	1	0.905	-0.893	0.878	0.018	0.189	0.018	-0.877	-0.018	-0.895	-0.009
flux_g1_m1	0.905	1	-0.985	0.987	-0.024	0.007	-0.039	-0.986	0.024	-0.999	0.033
flux_g2_m1	-0.893	-0.985	1	-0.965	0.008	-0.106	0.002	0.964	-0.008	0.983	-0.023
diffusion_g1_m1	0.878	0.987	-0.965	1	-0.044	-0.091	-0.065	-0.999	0.044	-0.993	0.051
diffusion_g2_m1	0.018	-0.024	0.008	-0.044	1	0.171	0.001	0.041	-1	0.03	-0.965
sigma_fission_g1_m1	0.189	0.007	-0.106	-0.091	0.171	1	0.288	0.094	-0.171	0.028	-0.129
sigma_fission_g2_m1	0.018	-0.039	0.002	-0.065	0.001	0.288	1	0.062	-0.001	0.046	0.241
sigma_transport_g1_m1	-0.877	-0.986	0.964	-0.999	0.041	0.094	0.062	1	-0.041	0.993	-0.049
sigma_transport_g2_m1	-0.018	0.024	-0.008	0.044	-1	-0.171	-0.001	-0.041	1	-0.03	0.965
sigma_total_g1_m1	-0.895	-0.999	0.983	-0.993	0.03	0.028	0.046	0.993	-0.03	1	-0.038
sigma_total_g2_m1	-0.009	0.033	-0.023	0.051	-0.965	-0.129	0.241	-0.049	0.965	-0.038	1

(COV-1)	kinf	flux_g1_m1	flux_g2_m1	diffusion_g1_m1	diffusion_g2_m1	sigma_fission_g1_m1	sigma_fission_g2_m1	sigma_transport_g1_m1	sigma_transport_g2_m1	sigma_total_g1_m1	sigma_total_g2_m1
case_Slatticekinf	4.8597E-006	1.5613E-006	-0.00000042	0.00077139	2.4838E-009	1.8972E-009	1.3221E-011	-0.00012461	-6.2981E-009	-0.0000103	-4.306E-009
case_Slatticeflux_g1_m1	1.5613E-006	0.1263E-007	-1.6458E-008	0.000030794	-1.1896E-009	2.5172E-011	-1.01E-011	-4.9776E-006	0.000000003	-4.0903E-006	5.8768E-009
case_Slatticeflux_g2_m1	-0.00000042	-1.6458E-008	4.5696E-010	-8.2122E-007	1.0597E-011	-1.0319E-011	1.6743E-014	1.3272E-007	-2.6987E-011	1.0999E-007	-1.1203E-010
case_Slattediffusion_g1_m1	0.00077139	0.000030794	-8.2122E-007	0.0015895	-1.0992E-007	-1.641E-008	-8.5797E-010	-0.00025685	2.7932E-007	-0.00020658	0.000000465
case_Slattediffusion_g2_m1	2.4838E-009	-1.1896E-009	1.0597E-011	-1.0992E-007	0.000000004	4.9094E-011	2.0913E-014	1.6811E-008	-1.0186E-008	9.7921E-009	-0.000000014
case_Slatticesigma_fission_g1_m1	1.8972E-009	2.5172E-011	-1.0319E-011	-1.641E-008	4.9094E-011	2.066E-011	4.317E-013	2.7591E-009	-1.2467E-010	6.5894E-010	-1.35E-010
case_Slatticesigma_fission_g2_m1	1.3221E-011	-1.01E-011	1.6743E-014	-8.5797E-010	2.0913E-014	4.317E-013	1.0838E-013	1.3157E-010	-5.3493E-014	7.9610E-011	1.8195E-011
case_Slatticesigma_transport_g1_m1	-0.00012461	-4.9776E-006	1.3272E-007	-0.00025685	1.6811E-008	2.7591E-009	1.3157E-010	0.000041573	-4.2721E-006	0.000033414	-7.1892E-008
case_Slatticesigma_transport_g2_m1	-6.2981E-009	0.000000003	-2.6987E-011	2.7932E-007	-1.0186E-008	-1.2467E-010	-5.3493E-014	-4.2721E-006	2.5864E-006	-2.4893E-008	3.505E-008
case_Slatticesigma_total_g1_m1	-0.0000103	-4.0903E-006	1.0999E-007	-0.000000465	9.7921E-009	6.5894E-010	7.9610E-011	0.000033414	-2.4893E-008	0.000027284	-4.5613E-008
case_Slatticesigma_total_g2_m1	-4.306E-009	5.8768E-009	-1.1203E-010	0.000000465	-0.000000014	-1.35E-010	1.8195E-011	-7.1892E-008	3.505E-008	-4.5613E-008	5.2786E-008

time(d)	kinf	flux_g1_m1	flux_g2_m1	diffusion_g1_m1	diffusion_g2_m1	sigma_fission_g1_m1	sigma_fission_g2_m1	sigma_transport_g1_m1	sigma_transport_g2_m1	sigma_total_g1_m1	sigma_total_g2_m1
0	1.39386	0.0768693	0.0119036	1.43281	0.362322	0.00361282	0.0784795	0.232822	0.919991	0.558609	1.40172

time(d)	kinf	flux_g1_m1	flux_g2_m1	diffusion_g1_m1	diffusion_g2_m1	sigma_fission_g1_m1	sigma_fission_g2_m1	sigma_transport_g1_m1	sigma_transport_g2_m1	sigma_total_g1_m1	sigma_total_g2_m1
0	0.00220447	0.000782708	2.13555E-005	0.039868	0.000063336	4.54537E-006	3.29215E-007	0.00644771	0.000160823	0.00522057	0.000229753

Con el fin de proporcionar información sobre la convergencia de la muestra, se presentan a continuación los resultados del cálculo del SAMPLER. En la figura 10 se muestra el histograma normalizado para todas las respuestas en la k_{eff} , y la respuesta media en función de la muestra y el error. Las figuras 11 y 12 son un ejemplo de la misma representación para el coeficiente de difusión y el flujo rápido y térmico.

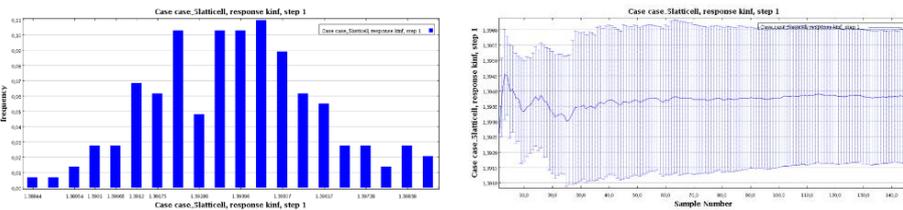


Figura 10: histograma normalizado y respuesta media para el cálculo de k_{eff} .

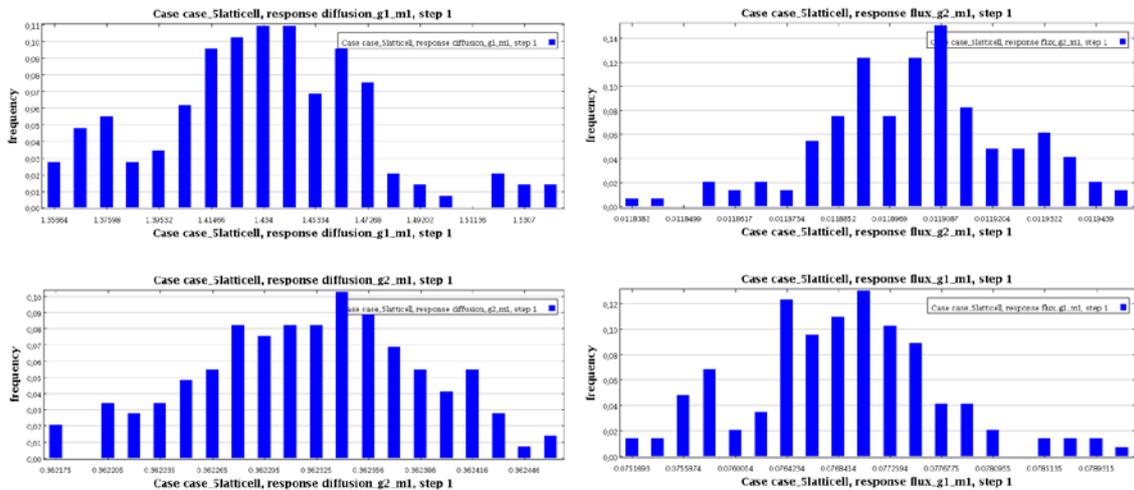


Figura 11: histograma del coeficiente de difusión y flujos.

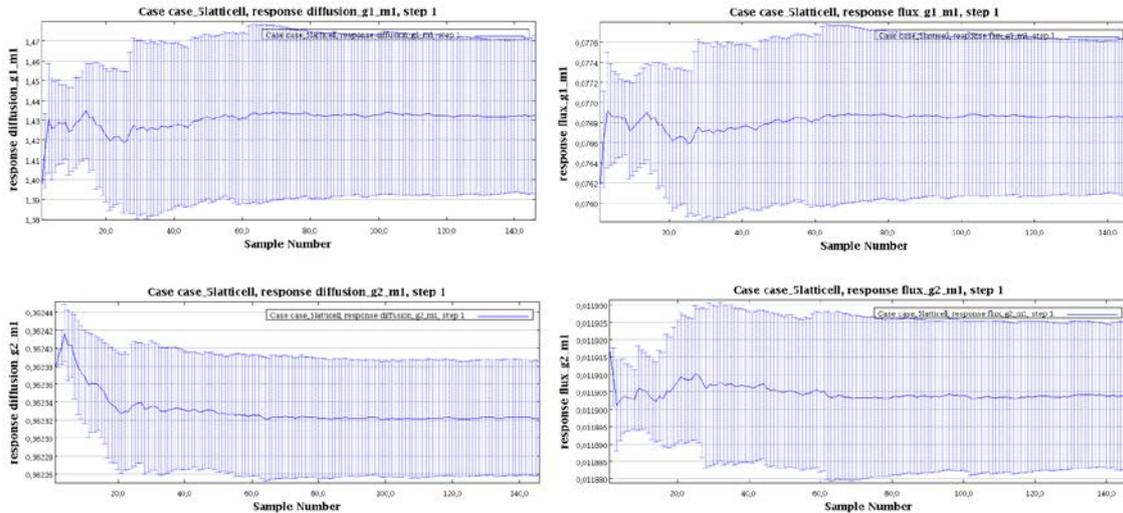


Figure 12: respuesta media para el cálculo del coeficiente de difusión y del flujo rápido y térmico.

En los resultados del SAMPLER es posible cuantificar la población respecto al valor medio y su desviación estándar. Como se muestra en la Figura 13 a continuación. Es una forma de verificar la teoría de Wilks en la que una fiabilidad mayor del 95% se alcanza con 146 muestras.

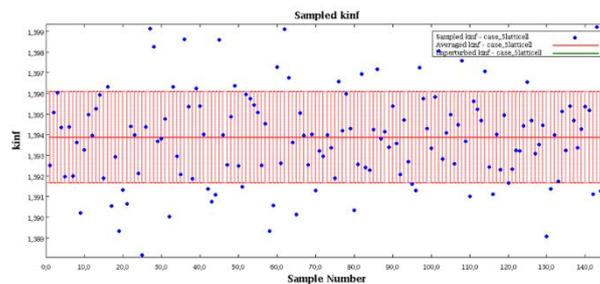


Figura 13: Población muestreadas con valor promedio y desviación estándar, en el cálculo de k_{eff} .

5. CONCLUSIONES

Este trabajo ha sido llevado a cabo en el marco del UAM-Benchmark Ejercicio I-1 Física de Celda y I-2 Física de Elemento. Los dos casos de prueba (PB-2 BWR y TMI-1 PWR) han sido analizados en dos configuraciones diferentes y dos estados diferentes, con el objetivo de cuantificar la incertidumbre en todas las etapas de cálculo y propagar las incertidumbres en el sistema LWR en su conjunto.

El cálculo del transporte se ha llevado a cabo con el código determinista TRITON/NEWT y el código estocástico SERPENT-2.1.22 con el objetivo de comparar la K_{eff} y las secciones eficaces resultantes, entre los dos códigos y con los valores de referencia del UAM-Benchmark.

Los cálculos de sensibilidad y el análisis de incertidumbre se han realizado con el módulo TSUNAMI, que hace uso de la Teoría de Perturbaciones Generalizada (GTP) y SAMPLER para la perturbación de secciones eficaces con técnicas de muestreo estocástico.

Las siguientes conclusiones se pueden destacar como significativas:

- TRITON es un código validado que ha reproducido satisfactoriamente los resultados del UAM-Benchmark, pero tiene tiempos computacionales más largos en comparación con el código SERPENT-2 que ha resultado ser más rápido para los cálculos del transporte. Sin embargo, SERPENT presenta algunas discrepancias con los resultados validados y de referencia, por lo tanto se necesitan ulteriores pruebas para verificar su comportamiento.

- El modulo TSUNAMI se ha adoptado para el análisis de sensibilidad y propagación de incertidumbre, y el impacto de las incertidumbres en los datos neutrónicos básicos en el cálculo del factor de multiplicación y secciones microscópicas y macroscópicas. La incertidumbre calculada ha resultado ser $\approx 0.5\%$ en la k_{eff} . Además, el $^{235}\text{U}_{nubar}$ y el $^{238}\text{U}_{n,gamma}$ resultaron ser los mayores contribuyentes en la incertidumbre de la k_{eff} para la configuración PWR-HFP-unrodded. Las soluciones deterministas se han comparado con las respuestas de SAMPLER, y se ha encontrado una buena correspondencia en los resultados para este ejercicio I-2 UAM-Benchmark.

6. REFERENCIAS

- [1] K. Ivanov, M. Avramova, S. Kamerow, et al., Benchmarks for Uncertainty Analysis in Modelling (UAM) for the Design, Operation and Safety Analysis of LWRs, NEA/NSC/DOC, 2012.
- [2] M. A. Jessee, M. D. DeHart, TRITON: A Multipurpose Transport, Depletion, and Sensitivity and Uncertainty Analysis Module, Oak Ridge National Laboratory, 2011.
- [3] M. A. Jessee, M. D. DeHart, NEWT: A New Transport Algorithm for Two-dimensional Discrete-ordinate Analysis in Non-orthogonal Geometries, Oak Ridge National Laboratory, 2011.
- [4] D. F. Hollenbach, L. M. Petrie, et al., KENO-VI: A General Quadratic Version of the KENO Program, Oak Ridge National Laboratory, 2009.
- [5] J. Leppänen, SERPENT: a Continuous-energy Monte Carlo Reactor Physics Burnup Calculation Code, VTT Technical Research Centre of Finland, 2013.
- [6] B. T. Rearden, M. A. Jessee, M. L. Williams, TSUNAMI-1D: Control Module for one-dimensional Cross-section Sensitivity and Uncertainty, Oak Ridge National Laboratory, 2011.
- [7] M. L. Williams, F. Havluj, D. Wiarda, I. C. Gauld, R. A. Lefebvre, K. J. Dugan, B. T. Rearden, W. A. Wieselquist, SAMPLER: A MODULE FOR STATISTICAL UNCERTAINTY ANALYSIS WITH SCALE SEQUENCES.
- [8] K. Ivanov, M. Avramova, S. Kamerow, et al., Benchmarks for Uncertainty Analysis in Modelling (UAM) for the Design, Operation and Safety Analysis of LWRs. Volume I: Specification and Support Data for Neutronics Cases (Phase I), OECD Nuclear Energy Agency, 2013.