

## **Estudio comparativo del ruido neutrónico mediante el uso del código neutrónico PARCS y del simulador de ruido neutrónico CORE SIM.**

Nicolás Olmo-Juan, Teresa Barrachina, Rafael Miró, Gumersindo Verdú  
*Instituto Universitario de Seguridad Industrial, Radiofísica y Medioambiental (ISIRYM)*  
*Universitat Politècnica de València*  
Camí de Vera s/n, 46022, Valencia, Spain  
[nioljua@iqn.upv.es](mailto:nioljua@iqn.upv.es), [tbarrachina@iqn.upv.es](mailto:tbarrachina@iqn.upv.es), [rmiro@iqn.upv.es](mailto:rmiro@iqn.upv.es), [gverdu@iqn.upv.es](mailto:gverdu@iqn.upv.es)

Christophe Demazière  
*Department of Applied Physics, Division of Subatomic and Plasma Physics*  
*Chalmers University of Technology*  
SE-412 96 Gothenburg, Sweden  
[demaz@chalmers.se](mailto:demaz@chalmers.se)

**Resumen** –En el registro de cualquier parámetro de proceso en un reactor nuclear, incluso cuando se opera a plena potencia y en condiciones de estado estacionario, se observa la presencia de fluctuaciones. Estas fluctuaciones (también llamadas ruido) se deben a, por ejemplo, fenómenos de turbulencia, ebullición del refrigerante, vibraciones mecánicas, etc. La monitorización de esos parámetros permite detectar, utilizando la instrumentación existente y sin introducir ninguna perturbación externa del sistema, posibles anomalías antes de que tengan cualquier efecto inadvertido en la seguridad y disponibilidad de la planta. En el trabajo propuesto, el código de difusión neutrónico PARCS, basado en el dominio del tiempo, se ha usado para modelar el efecto de perturbaciones estacionarias en los reactores nucleares. Los resultados de tales simulaciones se compararon con los resultados de las simulaciones realizadas en el dominio de la frecuencia utilizando la herramienta CORE SIM, desarrollada por Chalmers University of Technology. Dicha comparativa se ha realizado mediante la simulación de diversos casos basados en un modelo de reactor real. Además, se ha implementado una metodología destinada a permitir la comparación de los resultados obtenidos empleando estos dos tipos diferentes de herramientas. Se demostró que PARCS, aunque no ha sido desarrollado originalmente para tales cálculos, puede reproducir patrones de ruido de neutrones para frecuencias razonables. Sin embargo, también se ha observado que, en ocasiones, se obtuvieron resultados no físicos.

### **1. INTRODUCCIÓN.**

El análisis del ruido neutrónico es de gran interés para la industria nuclear. En general, dicho ruido surge de las fluctuaciones originadas por las vibraciones mecánicas, la ebullición del refrigerante, la turbulencia, etc. El monitoreo del efecto de tales fluctuaciones en el flujo neutrónico ofrece la posibilidad de detectar de manera temprana anomalías e incluso, si se implementan técnicas de inversión adecuadas, para hacer una caracterización de la anomalía observada [1].

En este sentido, recientemente se lanzó un nuevo proyecto Horizonte2020 financiado por la Comisión Europea. El proyecto, coordinado por Chalmers University of Technology, se llama CORTEX (CORE monitoring Techniques and EXPERIMENTAL validation and demonstration). La ambición del proyecto [2] es el desarrollo de técnicas de monitoreo del núcleo basadas en el ruido neutrónico para su uso en reactores comerciales con el objetivo de facilitar la detección y caracterización de las anomalías de manera temprana. De esta forma, se podrían tomar las medidas adecuadas antes de que dichas anomalías tengan efectos inadvertidos en la seguridad y la disponibilidad de la planta.

El análisis de estas oscilaciones requiere la determinación previa de la función de transferencia del reactor, que proporciona la respuesta del reactor a perturbaciones predeterminadas. Para su obtención, se pueden aplicar dos enfoques diferentes para tal propósito: cálculos basados en el dominio del tiempo o en el de la frecuencia.

El modelado en el dominio de frecuencia generalmente se realiza utilizando herramientas dedicadas, que resuelven por separado el flujo de neutrones estático y el ruido neutrónico. En el dominio del tiempo, por otro lado, las simulaciones se llevan a cabo resolviendo las ecuaciones de la difusión neutrónica sin separar las partes estática y fluctuante. Dichas herramientas dependientes del tiempo no se desarrollaron originalmente para modelar las fluctuaciones del flujo de neutrones, pero algunos intentos recientes han sido reportados en la literatura [3]. Por lo tanto, es necesario demostrar si tales herramientas dependientes del tiempo proporcionan resultados físicamente sólidos, utilizando como referencia las herramientas basadas en la frecuencia.

En este trabajo, se presenta un estudio comparativo de estas dos metodologías. Las herramientas elegidas para la comparación son el código PARCSv3.2 [4] basado en el dominio del tiempo, que es el código de difusión neutrónica de referencia para la NRC (Comisión Reguladora Nuclear de Estados Unidos); y la herramienta basada en el dominio de la frecuencia CORE SIM [5], un simulador de ruido de neutrones desarrollado por Chalmers University of Technology. Así mismo, se consideraron dos tipos diferentes de perturbaciones: un absorbente de longitud variable y una perturbación viajera.

El documento está estructurado de la siguiente manera. En la segunda sección, se realiza un esbozo de la metodología desarrollada para cada tipo de transitorio y código simulado. En el tercer apartado, se presentan y discuten los resultados. Finalmente, en la cuarta sección, se resumen las principales conclusiones.

## 2. METODOLOGÍA

En el presente apartado se detalla la metodología seguida para la simulación de los casos objeto de estudio con las herramientas neutrónicas PARCSv3.2 y CORE SIM.

El caso que servirá de base para este estudio corresponde a la configuración neutrónica de una central nuclear de referencia.

### 2.1. Metodología para casos estacionarios.

Antes de considerar la realización de transitorios de ruido neutrónico, se debe verificar que los dos códigos utilizados brinden resultados consistentes para la configuración del núcleo de estado estable nominal.

El punto de partida es la definición del modelado del caso en PARCS. Una vez obtenido, se genera un modelo en CORE SIM equivalente. Los datos de entrada que necesita CORE SIM son las dimensiones de cada nodo elemental en las direcciones x, y, z; así como el valor de las diferentes secciones eficaces en cada nodo. En base a estos datos, CORE SIM resuelve la ecuación de difusión para el reactor modelado que contiene tantos nodos como entradas distintas a cero en las matrices de los conjuntos de secciones eficaces.

El conjunto de secciones eficaces introducidos en CORE SIM se obtienen a partir de la impresión de las mismas durante la ejecución de PARCS y que son calculadas de los archivos de secciones eficaces (archivos nemtab/r) para las correspondientes condiciones termohidráulicas en estado estacionario. Una vez impresos, los datos fueron reordenados y escritos en un formato directamente legible en Matlab y CORE SIM. Se creó un programa para esta tarea específica.

Por último, se llevaron a cabo diversas pruebas para verificar que las secciones eficaces impresas por PARCS incluyan la corrección debido a la presencia de Xenón en el reactor.

## 2.2. Metodología para casos transitorios.

En cuanto a la implementación de casos transitorios, se investigaron dos tipos de problemas:

- Caso de un absorbente de longitud variable.
- Caso de una perturbación viajera de la densidad del refrigerante desde la entrada a la salida de un conjunto de combustible dado.

La principal diferencia entre ambos casos es que en el primer caso la perturbación se restringe a un solo nodo, para el cual la amplitud y la fase de la perturbación se pueden establecer arbitrariamente. Por otro lado, en el caso de una perturbación causada por una perturbación viajera, la determinación de la amplitud y fase de la perturbación aplicada es notablemente más complicada, pues ésta última debe tener en cuenta el desfase debido a la distancia entre cada uno de los nodos.

Debe enfatizarse que CORE SIM solo es capaz de definir una perturbación en términos de fluctuaciones de secciones transversales. Por lo que deberá post-procesarse la evolución de las secciones eficaces impresas de PARCS para su correcta definición.

Además, mientras que la herramienta CORE SIM está diseñada explícitamente para realizar este tipo de simulación, este no es el caso de PARCS. Por lo que modelar este tipo de transitorios implica un considerable número de modificaciones y el desarrollo de herramientas auxiliares externas.

Debe mencionarse que, dado que CORE SIM solo usa un grupo de precursores de neutrones retardados, se adoptó el mismo número de grupos en PARCS.

## 3. RESULTADOS

En esa sección, se presenta una comparación entre los resultados obtenidos haciendo uso de las herramientas PARCSv3.2 y CORE SIM. Las simulaciones de estado estacionario se presentan primero, seguidas por los resultados de los casos transitorios correspondientes a un absorbente de longitud variable y una perturbación viajera.

### 3.1. Resultados de los casos estacionarios.

El propósito de la comparación de los resultados estacionarios obtenidos es escoger el método numérico apropiado a utilizar en PARCSv3.2 para que se pueda llevar a cabo una fiel comparación entre PARCSv3.2 y CORE SIM para las simulaciones de ruido neutrónico. Además, se realiza una evaluación del nivel de refinamiento de malla necesario en CORE SIM.

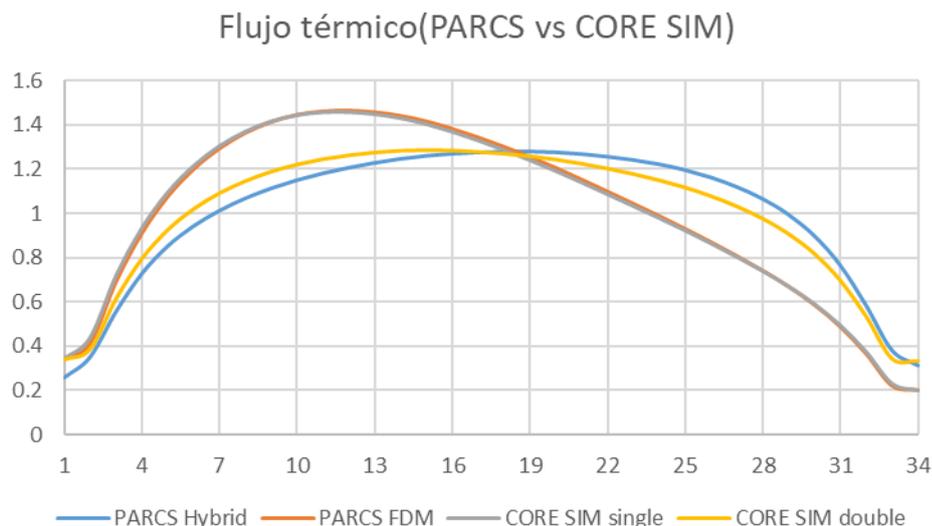
Se exponen a continuación las comparaciones de los valores de  $k_{ef}$  y de los perfiles axiales de flujo neutrónico. Se han testado diversas opciones: los dos tipos de discretización espacial más empleados en PARCSv3.2 (FDM o HYBRID), así como dos mallas en CORE SIM (una malla idéntica a la usada en PARCSv3.2 y una malla más refinada, obtenida al dividir cada celda en dos para cada dirección considerado). Los factores de discontinuidad del elemento (*Assembly Discontinuity Factor*, ADF) no se consideraron en PARCSv3.2 puesto que CORE SIM no los tiene en cuenta.

Como se ve, las diferencias en  $k_{ef}$  obtenidas entre PARCSv3.2 y CORE SIM son muy pequeñas cuando se elige la opción FDM en PARCS. Esto se explica por el hecho de que CORE SIM también se basa en diferencias finitas.

**Tabla 1. Resultados de la comparación entre PARCSv3.2 y CORE SIM para la k-efectiva**

	PARCS Hybrid	PARCS FDM	CORE SIM	CORE SIM (malla refinada)
<b>K-Efectiva:</b>	1.000451	1.022211	1.022336	1.005247
		<b>FDM vs CS</b>	<b>-12.5 pcm</b>	

Se puede observar en la Figura 1 que, de forma coherente, se obtiene una mejor coincidencia entre ambos códigos cuando se elige FDM como operador nodal en PARCS y cuando se usa la malla más simple para CORE SIM. También debe tenerse en cuenta que los resultados que utilizan una malla refinada en CORE SIM y el método híbrido en PARCSv3.2 parecen ser relativamente similares. Sin embargo, para la realización de este estudio, se escoge la opción que proporciona errores mínimos. Es decir, la opción FDM para PARCSv3.2 y la malla simple en CORE SIM.



**Figura 1. Comparación de los perfiles axiales del flujo térmico para PARCSv3.2 y CORE SIM.**

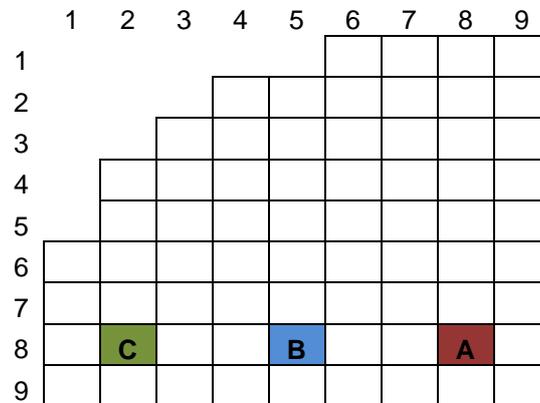
### 2.1. Resultados transitorios.

Una vez que se obtuvieron los resultados correspondientes al estado estacionario y se eligieron los modelos de CORE SIM y PARCSv3.2 que se emplearan en la comparativa, se realizaron las simulaciones transitorias. Como ya ha sido mencionado, se consideraron dos casos diferentes: un absorbente de longitud variable y una perturbación viajera. Para cada caso, se consideraron diversas simulaciones para probar la influencia de:

- La frecuencia de la perturbación: 1 Hz ó 10 kHz,
- La amplitud de la perturbación: 1% ó 5%,
- Y la ubicación de la perturbación: tres posiciones diferentes, desde el centro hasta la periferia del núcleo y ubicadas en el cuarto superior izquierdo del núcleo.

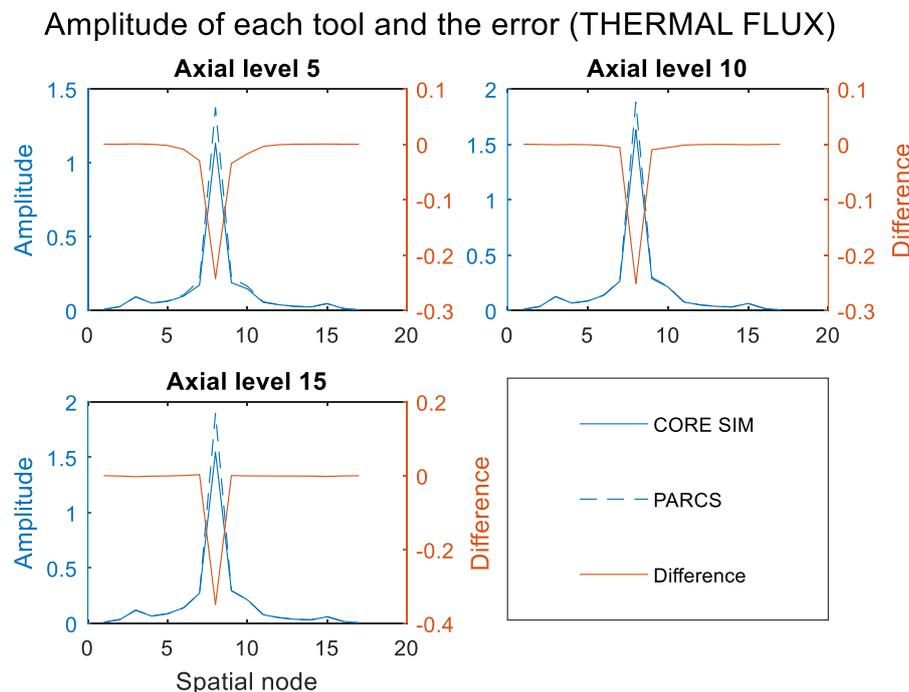
El primer objetivo de este estudio es verificar si se obtienen tendencias similares en ambos códigos. Así, en lo sucesivo los resultados se presentan como variaciones espaciales de los resultados a lo largo de las direcciones características elegidas en el núcleo. Debe señalarse que, en algunos nodos específicos, sin embargo, se obtuvieron grandes discrepancias. En aras de la

brevidad, solo se mostrarán dos casos representativos. Una compilación de todos los resultados numéricos más allá de estos dos casos se presenta en el Anexo.



**Figura 2. Cuarto superior izquierdo del núcleo que muestra la localización de las tres posiciones contempladas.**

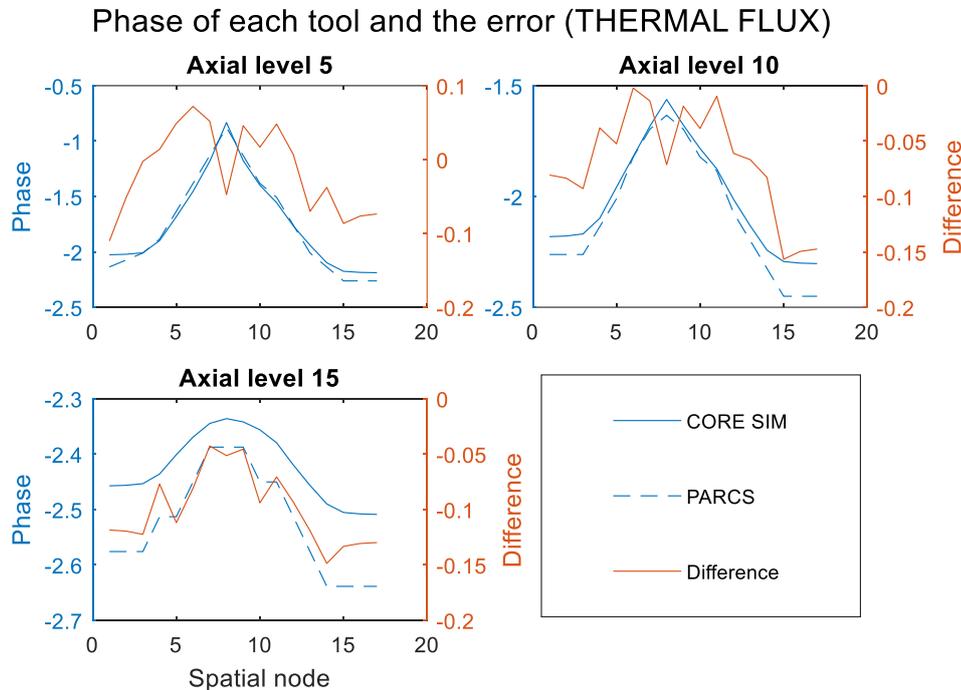
Como puede verse en las Figuras 3 y 4 correspondientes al caso de perturbación de viaje en el punto A con una frecuencia de 1 Hz y un 5% de ganancia, se muestra un ajuste realmente bueno para la distribución espacial de la amplitud y la fase del flujo térmico, con un reducido error absoluto. Los resultados correspondientes al flujo rápido (no mostrados aquí) son equivalentes.



**Figura 3. Amplitudes de PARCSv3.2 y CORE SIM, y el error absoluto entre ambas para el caso de una perturbación viajera de 1 Hz, localizada en el punto A y 5% de ganancia.**

Cabe mencionar que se tuvieron que hacer algunos cambios adicionales en el código fuente de PARCSv3.2 para aumentar el número de cifras significativas con que el código imprime los resultados del flujo neutrónico para cada celda. Esto es debido al hecho en PARCS no se realiza un cálculo separado de los valores estáticos y del ruido neutrónico, por lo que, sin dicha modificación,

los valores extraídos para las fluctuaciones no serían capaces de representar debidamente las fluctuaciones del núcleo, obteniéndose resultados no físicos en términos de ruido neutrónico.



**Figura 4. Fases de PARCSv3.2 y CORE SIM, y el error absoluto entre ambas para el caso de una perturbación viajera de 1 Hz, localizada en el punto A y 5% de ganancia.**

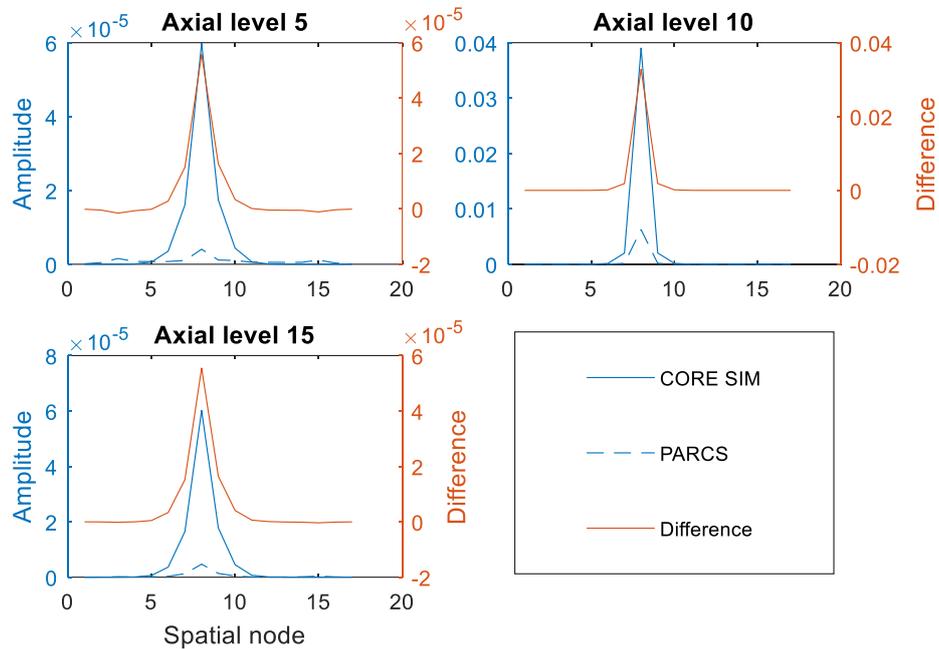
Para la representación de un caso correspondiente a un transitorio debido a un absorbente de longitud variable se presentan en las Figura 5 y 6 la evolución de la amplitud y la fase del flujo térmico para una perturbación localizada en la posición A, de 10 kHz y con un 1% de amplitud. Esta perturbación se encuentra confinada en el décimo nivel axial desde la parte inferior del núcleo (de 34 niveles posibles). Como se puede ver en la Figura 5, las discrepancias entre los dos códigos parecen ser aceptables en el plano axial donde se ubica la perturbación. Sin embargo, para planos axiales más alejados del plano en que la perturbación es introducida, a veces se obtienen grandes discrepancias, debido a resultados aparentemente no físicos en las simulaciones PARCS.

Por otro lado, respecto a la fase del ruido neutrónico, se observan grandes discrepancias, como se ilustra en la Figura 6. Esto podría explicarse por la dificultad en el post-procesamiento de los resultados de PARCSv3.2 con respecto a la determinación de la fase.

Este estudio representa una primera evaluación de la metodología desarrollada para que PARCSv3.2 puede modelar fielmente cálculos de ruido neutrónico. Se observa en particular que las frecuencias más cercanas a las escalas de tiempo habituales utilizadas en los cálculos dependientes del tiempo parecen proporcionar resultados mucho mejores que las frecuencias muy altas. Aunque no se muestra en este documento, también se obtuvieron mejores resultados para las perturbaciones más centradas.

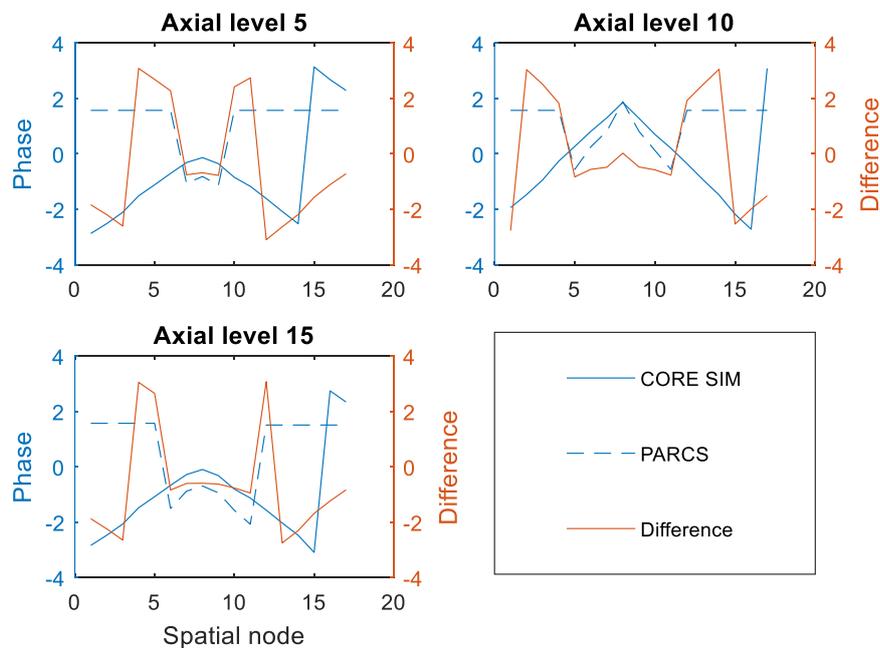
Finalmente, se presenta una compilación de los errores máximos y el RMS para cada simulación en las tablas 2 y 1 del Anexo. Los errores correspondientes a la amplitud se muestran en términos relativos (%) mientras que los errores de fase se dan en radianes. Debe notarse que, para algunas de las simulaciones, se obtienen discrepancias muy grandes tanto en el RMS como en los errores máximos que, en ocasiones, son debidas a la propia obtención del error relativo.

Amplitude of each tool and the error (THERMAL FLUX)



**Figura 5. Amplitudes de PARCSv3.2 y CORE SIM, y el error absoluto entre ambas para el caso de un absorbente de longitud variable de 10 kHz, localizada en el punto A y 1% de ganancia.**

Phase of each tool and the error (THERMAL FLUX)



**Figura 6. Fases de PARCSv3.2 y CORE SIM, y el error absoluto entre ambas para el caso de un absorbente de longitud variable de 10 kHz, localizada en el punto A y 1% de ganancia.**

## 4. CONCLUSIONES.

En este trabajo, se ha desarrollado una metodología para comparar los resultados de las simulaciones de ruido de neutrones utilizando el código basado en el dominio del tiempo, PARCSv3.2, y la herramienta basada en el dominio de la frecuencia, CORE SIM. Esto ha requerido de la realización de cambios en el código fuente de PARCSv3.2 para: a) ser capaz de introducir perturbaciones en el modelo, b) editar las secciones transversales correspondientes y c) editar el número de cifras significativas con que PARCS imprime los valores del flujo neutrónico.

Los resultados obtenidos en este estudio demuestran que PARCS, aunque no está desarrollado para ese propósito, puede proporcionar una estimación aceptable del ruido neutrónico para frecuencias razonables (alrededor de 1 Hz), pese a que en algunas posiciones dentro del núcleo se han obtenido resultados no físicos. Por otra parte, para frecuencias mucho más altas, PARCS no parece reproducir fielmente el ruido de neutrones.

## AGRADECIMIENTOS.

Este trabajo se realizó bajo el contrato predoctoral FPI Subprograma 1 y ayudas a la movilidad de la Universitat Politècnica de Valencia y el apoyo del Ministerio de Ciencia e Innovación español en el marco del proyecto ENE2017-89029-P. La investigación que condujo a estos resultados también se financió parcialmente con cargo al programa de investigación y formación Euratom 2014-2018 en virtud del acuerdo de subvención nº 754316.

El primer autor desea agradecer todo el apoyo y la ayuda personal recibida de los Profesores Christophe Demazière y Paolo Vinai, así como a todo el personal del Departamento de Física Aplicada de la Universidad de Tecnología de Chalmers durante la primera visita del autor a Chalmers.

## REFERENCIAS.

1. I. Pázsit and C. Demazière, Noise techniques in nuclear systems, Chapter in the Handbook of Nuclear Engineering, D. Cacuci, Ed., ISBN 978-0-387-98150-5, Springer, Vol. 3 (2010).
2. "CORTEX WEBSITE," <http://cortex-h2020.eu/>
3. D. Chionis, A. Dokhane, L. Belblidia, M. Pecchia, G. Girardin, H. Ferroukhi, A. Pautz, "SIMULATE-3K Analyses of Neutron noise response to fuel assembly vibrations and thermal-hydraulics parameters fluctuations," Int. Conf. Mathematics & Computational Methods Applied to Nuclear Science & Engineering (M&C 2017), Jeju, Korea, April 16-20, 2017 (2017).
4. T. Downar, Y. Xu, V. Seker. DRAFT (01/16/12) PARCSv3.0 U.S. NRC Core Neutronics Simulator THEORY MANUAL. Department of Nuclear Engineering and Radiological Sciences, University of Michigan, MI, USA (2012)
5. C. Demazière, "CORE SIM: A multi-purpose neutronic tool for research and education," Annals of Nuclear Energy, 38 (12), pp. 2698-2718 (2011).

## ANEXO

**Tabla 2. Compilación de las diferencias entre PARCSv3.2 y CORE SIM para el caso de un absorbente de longitud variable.**

		ABSORBENTE DE LONGITUD VARIABLE												
		Frecuencia	1 Hz						10 kHz					
		Posición	A		B		C		A		B		C	
		Amplitud	5%	1%	5%	1%	5%	1%	5%	1%	5%	1%	5%	1%
Amplitud	Rápido	Max. Error	38.21%	38.00%	38.52%	38.17%	38.49%	37.76%	16926%	50002%	19662%	24825%	74990%	12838%
		RMS	3.55%	3.51%	3.62%	3.55%	3.62%	3.58%	197%	216%	203%	209%	213%	191%
	Térmico	Max. Error	32.24%	33.08%	47.71%	48.67%	53.05%	55.01%	12264%	3976%	3068%	7278%	4218%	30126%
		RMS	2.26%	2.20%	2.34%	2.24%	2.32%	2.25%	146%	143%	138%	146%	149%	178%
Fase	Rápido	Max. Error	0.5666	0.3267	1.2092	0.6796	0.7492	1.5118	3.1408	3.1408	3.1413	3.1413	3.1415	3.1415
		RMS	0.2448	0.2005	0.3387	0.3067	0.5201	0.5684	1.7469	1.7503	1.5778	1.5817	1.5419	1.5397
	Térmico	Max. Error	0.5669	0.3262	2.7081	0.641	0.7448	1.4501	3.1391	3.1408	3.1413	3.1413	3.1412	3.1412
		RMS	0.2441	0.2181	0.3899	0.2846	0.5227	0.6086	1.5472	1.5614	1.5666	1.5884	1.6223	1.6311

**Tabla 3. Compilación de las diferencias entre PARCSv3.2 y CORE SIM para el caso de una perturbación viajera.**

		PERTURBACIÓN VIAJERA												
		Frecuencia	1 Hz						10 kHz					
		Posición	A		B		C		A		B		C	
		Amplitud	5%	1%	5%	1%	5%	1%	5%	1%	5%	1%	5%	1%
Amplitud	Rápido	Max. Error	76%	296%	300%	334%	489%	4314%	7258%	15268%	40626%	35371%	43674%	18498%
		RMS	4.51%	14.14%	16.06%	32.74%	14.68%	69.07%	168%	178%	166%	194%	187%	190%
	Térmico	Max. Error	420%	352%	551%	564%	174%	4190%	6139%	27145%	46552%	24828%	8613%	13740%
		RMS	3.37%	13.50%	16.17%	33.16%	13.98%	69.86%	143%	151%	138%	140%	145%	154%
Fase	Rápido	Max. Error	1.1521	1.3932	3.1415	3.1413	3.1246	3.1184	3.1398	3.1324	3.1413	3.1415	3.14	3.1406
		RMS	0.084	0.3412	2.5266	2.5354	0.3003	0.907	1.1009	1.0517	1.6151	1.5721	1.6922	1.664
	Térmico	Max. Error	1.4598	1.3575	3.1415	3.1413	3.1354	3.1304	3.1411	3.1401	3.1412	3.1414	3.1403	3.1411