# Validación del código AZTRAN 1.1 con problemas Benchmark de reactores LWR

Julio Amhed Vallejo Quintero, Guillermo Elías Bastida Ortiz, Juan Luis François Lacouture

Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Ingeniería Departamento de Sistemas Energéticos Av. Universidad 3000, C.U. 04510 México, D.F. amhed.jvq@gmail.com; gbo729@yahoo.com.mx; jlf@fi-b.unam.mx

José Vicente Xolocostli Munguía, Armando Miguel Gómez Torres Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares Carretera México-Toluca S/N, La Marquesa, Ocoyoacac, México, 50180 vicente.xolocostli@inin.gob.mx; armando.gomez@inin.gob.mx

#### Resumen

El módulo AZTRAN es un programa de cómputo que forma parte de la plataforma AZTLAN (plataforma mexicana de modelación para el análisis y diseño de reactores nucleares) y que resuelve la ecuación de transporte de neutrones en 3D usando el método de ordenadas discretas  $S_N$ , en estado estacionario y geometría cartesiana. Como parte de las actividades del Grupo de Trabajo 4 (Grupo de Usuarios) del proyecto AZTLAN, en este trabajo se realiza la validación del código AZTRAN utilizando como ejemplos el Benchmark de Yamamoto, del año 2002, para reactores LWR. Para comparación es utilizado el código comercial CASMO-4 y el código libre SERPENT-2; además, los resultados son comparados con los datos obtenidos de un artículo del congreso PHYSOR 2002. El Benchmark consiste en un pin de combustible, dos celdas de UO<sub>2</sub> y otras dos de MOX; se tiene un problema de cada celda para cada tipo de reactor PWR y BWR. A pesar de que el código AZTRAN se encuentra en una fase temprana de desarrollo, los resultados obtenidos son alentadores y cercanos a los reportados con otros códigos y metodologías aceptados internacionalmente.

#### 1. INTRODUCCIÓN

El proyecto AZTLAN consiste en el desarrollo de una plataforma de modelación para el análisis y diseño de reactores nucleares [1]. Es una iniciativa nacional liderada por el Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares, que reúne a las principales instituciones públicas de educación superior de México, como son el Instituto Politécnico Nacional, la Universidad Nacional Autónoma de México y la Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Iztapalapa, en un esfuerzo por situar a México en el mediano plazo en un nivel internacional

competitivo en temas de software para análisis de reactores nucleares. Este proyecto es financiado por el fondo mixto SENER-CONACYT de Sustentabilidad Energética, proyecto estratégico No. 212602.

El problema Benchmark [2] con el cual se hace la comparación en este trabajo, no toma en cuenta las actuales limitaciones de diseño de los reactores de agua ligera, como el enriquecimiento del U-235 mayor al 5%, el quemado máximo de descarga o la integridad mecánica del combustible. Sin embargo, son excelentes ejemplos para la validación del código AZTRAN 1.1. El problema Benchmark no es resuelto en su totalidad con el código AZTRAN, debido a sus limitaciones, ya que aún se encuentra en fase de desarrollo. Se comparan los resultados con el artículo presentado en PHYSOR 2002 [3], para darle mayor robustez y confiabilidad al análisis.

## 2. DESCRIPCION DE LOS CÓDIGOS

### 2.1. Código AZTRAN-1.1

El módulo AZTRAN 1.1 [4] es un programa de cómputo que forma parte de la plataforma AZTLAN y que resuelve la ecuación de transporte de neutrones en 3D usando el método de ordenadas discretas  $S_N$  y el esquema nodal RTN-0, en estado estacionario y geometría cartesiana. AZTRAN 1.1 utiliza como información de entrada una biblioteca de secciones eficaces externa (en este trabajo, se utiliza SERPENT-2 [5]) para varios grupos de energía, así como una descripción geométrica del arreglo a modelar sobre el que resuelve numéricamente la ecuación de transporte. El programa AZTRAN 1.1 proporciona una solución al problema de valor propio y determina la distribución de neutrones en un medio específico para el número de grupos de energía que se requieran, y con el orden de aproximación de ordenadas discretas que se desee. Para este análisis se utilizó la ordenada discreta  $S_N = 4$  sin la opción de rebalance.

### 2.2. Código CASMO-4

El paquete de cómputo CMS [6] consta de los siguientes códigos: INTERPIN-3, CASMO-4, CMSLINK, SIMULATE-3, SIMULATE-3K, SIMULATE-3R, CMSVIEW; en este trabajo solamente se utiliza el código CASMO-4.

CASMO-4 es un código bidimensional, basado en la teoría de transporte de neutrones en multigrupos, para cálculos de quemado en ensambles de reactores BWR y PWR, que utiliza el método de las características. El código utiliza una geometría consistente de barras de combustible cilíndricas de composición variada en un arreglo cuadrado, con opción para barras de control, barras absorbedoras quemables, barras de control del tipo *cluster*, canales de instrumentación, espacios de agua y barras de control cruciforme en las regiones de separación del ensamble.

## 2.3. Código SERPENT-2

SERPENT es un código que resuelve la ecuación de transporte neutrónico mediante el método de Monte Carlo. Fue desarrollado en el Centro de Investigación Técnica VTT de Finlandia desde el 2004 y continuamente se está actualizando. En este momento se cuenta con la versión 2. Dentro de los usos de SERPENT se puede destacar la verificación y validación de códigos de transporte determinístico, pues al ser un código tipo Monte Carlo y verificando que la solución cumpla con una buena estadística, se puede considerar como una solución de referencia. Adicionalmente, tiene la característica de funcionar como un código de celda y generar secciones eficaces y parámetros nucleares para usarse en los códigos determinísticos, como se hace para AZTRAN en este estudio.

# 3. DESCRIPCIÓN DEL BENCHMARK

## 3.1. Celda de combustible con UO2 para el BWR

La configuración geométrica del modelo utilizado corresponde a un diseño de ensamble 9x9, en el cual los contenidos físiles aseguran quemados promedio a la descarga de 70 GWd/t para 18 meses de operación. Se consideran barras de combustibles con cinco tipos de enriquecimiento: cuatro de los cuales son con  $UO_2$  y sólo un tipo con  $UO_2$ -Gd<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, siendo el enriquecimiento promedio del ensamble del 5.5 w/o.

- La densidad de potencia utilizada es de 25 W/gU (52.32 W/cm<sup>3</sup>).
- La temperatura utilizada para condiciones en caliente es: combustible 900 K, moderador 600 K.
- La temperatura utilizada para condiciones en frio para combustible y moderador de 300 K.

La Figura 1 muestra la configuración geometría del ensamble BWR y la Tabla I presenta la descripción y dimensionamiento de los componentes del mismo; en la Tabla II se presenta para cada tipo de barra, su densidad, enriquecimiento, concentración y densidad atómica.



Figura 1 Configuración geométrica del ensamble de combustible BWR UO2

Descripción	Dimensión [cm]
Barra de combustible UO <sub>2</sub> Tipo 1	
Barra de combustible UO <sub>2</sub> Tipo 2	Diámetro combustible: 0.98
Barra de combustible UO <sub>2</sub> Tipo 3	Espesor encamisado: 0.14
Barra de combustible UO <sub>2</sub> Tipo 4	Pitch: 1.44
Barra de combustible UO2 Tipo G	
Barra de agua	Diámetro interno: 2.35 Diámetro externo: 2.49
Pitch del ensamble	15.24
Espesor de la caja	0.25
Distancia entre el encamisado y la caja	0.38
Espesor del gap de agua	0.67

#### Tabla I Dimensiones del ensamble de combustible BWR UO2

	Tipo 1	Tipo 2	Tipo 3	Tipo 4	Tipo G
Número de Barras	38	8	8	4	16
Densidad de UO <sub>2</sub>	10.1	10.1	10.1	10.1	9.8
[g/cm <sup>3</sup> ]					
Enriquecimiento de	6.3	5.0	4.0	3.0	5.0
<sup>235</sup> U w/o					
Concentración de	0	0	0	0	6.0
Gd <sub>2</sub> O <sub>3</sub> w/o					
Densidad Atómica					
[at/barn-cm]					
<sup>235</sup> U	1.4322E-3	1.367E-3	9.0936E-4	6.8203E-4	1.0389E-3
<sup>238</sup> U	2.1032E-2	2.1324E-2	2.1549E-2	2.1774E-2	1.9490E-2
<sup>16</sup> O	4.492E-2	4.4921E-2	4.4916E-2	4.4912E-2	4.3985E-2
$^{154}$ Gd	0	0	0	0	4.1864E-5
<sup>155</sup> Gd	0	0	0	0	2.8739E-4
<sup>156</sup> Gd	0	0	0	0	3.9950E-4
<sup>157</sup> Gd	0	0	0	0	3.0602E-4
<sup>158</sup> Gd	0	0	0	0	4.8536E-4
<sup>160</sup> Gd	0	0	0	0	4.3093E-4

Tabla II Especificaciones del combustible

## **3.2.** Celda de combustible con MOX para el PWR

La configuración geométrica del modelo utilizado corresponde a un diseño de ensamble 17x17, en el cual los contenidos físiles aseguran quemados promedio a la descarga de 70 GWd/t para 21 meses de operación. Se consideran barras de combustibles con 3 tipos de combustibles MOX, teniendo un promedio de 11 w/o de plutonio físil.

- La densidad de potencia utilizada es de 36.6 W/gHM (102.2 W/cm<sup>3</sup>).
- La temperatura utilizada para condiciones en caliente es: combustible 900 K, moderador 600 K.
- La temperatura utilizada para condiciones en frio para combustible y moderador de 300 K.

La Figura 2 muestra la configuración geometría del ensamble PWR y la Tabla III presenta la descripción y dimensionamiento de los componentes del mismo; en la Tabla IV se presenta para cada tipo de barra, su densidad, enriquecimiento, concentración y densidad atómica.



Figura 2 Configuración geométrica del ensamble de combustible PWR MOX

Descripción	Dimensión [cm]
Barra de combustible Pu bajo	
Barra de combustible Pu medio	Diámetro combustible: 0.824
Barra de combustible Pu alto	Espesor encamisado: 0.128
	Diámetro interno: 1.14
Barra de combustible UO <sub>2</sub> Tipo 4	Diámetro externo: 1.22
	Diámetro interno: 1.14
Barra de combustible UO <sub>2</sub> Tipo G	Diámetro externo: 1.22
Pitch del ensamble	21.505

### Tabla III Dimensiones del ensamble de combustible PWR MOX

	Pu bajo	Pu medio	Pu alto	Composición Pu w/o					
Número de Barras	12	76	176						
Densidad de UO <sub>2</sub>	10.4	10.4	10.4						
$[g/cm^3]$									
Enriquecimiento de	0.2	0.2	0.2						
<sup>235</sup> U w/o									
Concentración total	7.5	14.4	19.1						
de Pu w/o									
Concentración fisil	4.8	9.2	12.2						
de Pu w/o									
Densidad Atómica									
[at/barn-cm]									
<sup>235</sup> U	4.3463E-5	4.0212E-5	3.8000E-5						
<sup>238</sup> U	2.1408E-2	1.9812E-2	1.8724E-2						
<sup>16</sup> O	4.6358E-2	4.6338E-2	4.6325E-2						
<sup>238</sup> Pu	3.6652E-5	7.0251E-5	9.3169E-5	2.1					
<sup>239</sup> Pu	9.4712E-4	1.8154E-3	2.4075E-3	54.5					
<sup>240</sup> Pu	4.3265E-4	8.2927E-4	1.0997E-3	25.0					
<sup>241</sup> Pu	1.6026E-4	3.0720E-4	4.0739E-4	9.3					
<sup>242</sup> Pu	1.0984E-4	2.1052E-4	2.7920E-4	6.4					
<sup>241</sup> Am	4.6536E-5	8.9200E-5	1.1828E-4	2.7					

Tabla IV Especificaciones del combustible

### 4. RESULTADOS

#### 4.1. Celda de combustible con UO<sub>2</sub> para el BWR

Para la preparación de archivos en AZTRAN 1.1 es necesario hacer una malla de puntos discretos, para dividir cada material en celdas o nodos y que AZTRAN 1.1 pueda realizar los cálculos. La Figura 3 muestra el mallado del ensamble BWR.

En el archivo *input* de AZTRAN 1.1 se ingresan los datos geométricos, esto se realiza indicando los puntos de cada malla, entre más pequeño sea el mallado, el cálculo será más preciso, pero tomará mayor tiempo de cómputo. Se recomienda hacer un mallado por cada material distinto.

Una vez creada la celda o nodo, ésta corresponde a un material, para el cual se deben especificar:

- Número de grupos de energía.
- Sección eficaz macroscópica total ( $\Sigma T$ ) en cm<sup>-1</sup> del grupo K para el material N.
- Valor del producto del número de neutrones producidos por fisión (v) y la sección eficaz macroscópica de fisión ( $\Sigma f$ ) en cm-1 del grupo K para el material N.
- Valor del producto de la sección macroscópica de fisión ( $\Sigma f$ ) por el valor de producción de energía por fisión ( $\kappa$ ) del grupo K para el material N.
- Valores de las fracciones de neutrones que surgen de la fisión con energías pertenecientes al grupo K para el material N ( $\xi$ ).

Julio Amhed Vallejo Quintero et al, Validación del código AZTRAN 1.1 con problemas Benchmark de reactores LWR

- Elementos de la matriz de dispersión.
- Fuente de neutrones externas en n/cm3.

Para esta investigación, estos datos fueron generados para dos grupos de energía, con el corte térmico a 0.625 eV, con el código SERPENT-2 con las librerías ENDF/B-VII.



Figura 3 Mallado del ensamble BWR UO2 para AZTRAN 1.1

Los resultados que se muestran en este análisis son:

- K-infinita en caliente (900 K) con 0 y 40% de vacíos,
- Distribución de potencia en caliente con 0 y 40% de vacíos,
- K-infinita en frío (300 K) con 0% de vacíos,
- Distribución de potencia en frío con 0% de vacíos.

La Tabla V muestra los resultados que se obtuvieron a 900 K y 0% de vacíos con cada código:

Tabla V. Calculo de la K-mininta 500 K con 070 de vacios											
	AZTRAN	CASMO-	SERPENT2	Diferencia [pcm]							
		4									
Temperatura	K-inf	K-inf	K-inf	AZTRAN -	AZTRAN -						
[k]				CASMO-4	SERPENT2						
900	1.04891	1.04958	1.05731	-67.49	-840.49						

### Tabla V. Cálculo de la K-infinita 900 K con 0% de vacíos

La Figura 4, que es tomada de PHYSOR 2002, corresponde a la Kinf a 900K y 0% de vacíos; a 0 quemado, la K-inf se encuentra aproximadamente en un rango de 1.0 a 1.1.

Las cinco gráficas mostradas corresponden a los resultados reportados por los participantes, mostrados en la Tabla VI.

	Tubla VI Lista de participantes en el senemiatir y sus courgos							
ID	Organización	Código (Método)	Librería					
L	GNF-J	TGBLA (Difusión)	ENDF/B-V					
Μ	GNF-J	VMONT (Monte Carlo - Multigrupos)	JENDL-3.2					
G	TEPSYS	CASMO 4 (Prob. Colisión + Método	JEF-2.2					
		Características)						
J	NUPEC	CASMO 4 (Prob. Colisión + Método	ENDF/B-IV,					
		Características)	V					
F	Osaka Univ.	MVP-BURN (Monte Carlo – Energía Continua)	JENDL-3.2					

Tabla	<b>VI I</b>	Jista	de	partici	pantes	en el	benc	hmark v	sus códigos
							~ ~ ~ ~ ~ ~		



Burnup(GWd/t) Figura 4 PHYSOR 2002: K-inf del ensamble BWR UO2 900 K y 0% de vacíos

	Diffencia												
	1.4	79	1.31	4	1.317	1.514	1.51	1.511	1.314	1.31	1.4	474	
	1.3	14	1.06	6	0.304	0.884	0.962	0.885	0.303	1.064	1	.31	
	1.3	17	0.30	4	0.714	0.292	0.962	0.297	0.73	0.303	1.	314	
	1.5	14	0.88	4	0.292	1.11	0	0	0.297	0.885	1.	511	
	1.:	51	0.96	2	0.962	0	0	0	0.962	0.962	1	.51	
	1.5	11	0.88	5	0.297	0	0	1.11	0.292	0.884	1.	514	
	1.3	14	0.30	3	0.73	0.297	0.962	0.292	0.714	0.304	1.	317	
	1.	31	1.06	4	0.303	0.885	0.962	0.884	0.304	1.066	1.	314	
	1.4	74	1.3	1	1.314	1.511	1.51	1.514	1.317	1.314	1.4	479	
	1.2	18	1.23	4	1.25	1.394	1.376	1.395	1.25	1.234	1.2	217	
	1.2	34	1.23	4	0.383	0.973	1.038	0.977	0.384	1.237	1.2	234	
	1.	25	0.38	3	0.801	0.372	1.033	0.379	0.833	0.384	1.2	249	
	1.3	94	0.97	3	0.372	1.135	0	0	0.379	0.976	1.	393	
	1.3	76	1.03	8	1.033	0	0	0	1.033	1.037	1.3	375	
	1.3	95	0.97	7	0.379	0	0	1.135	0.372	0.972	1.	392	
	1.	25	0.38	4	0.833	0.379	1.033	0.372	0.8	0.383	1.2	248	
	1.2	34	1.23	7	0.384	0.976	1.037	0.972	0.383	1.233	1.2	232	
	1.2	17	1.23	4	1.249	1.393	1.375	1.392	1.248	1.232	1.2	215	
26.	1%	8	<b>.0%</b>	6	5.7%	12.0%	13.4%	11.6%	6.49	<mark>% 7.6</mark>	%	25.	7%
8.	0%	16	5.8%	7	7.9%	8.9%	7.6%	9.2%	8.19	% 17.3	%	7.	6%
6.	7%	7	.9%	8	3.7%	8.0%	7.1%	8.2%	10.39	8.1	%	6.	5%
12.	0%	8	<b>.9%</b>	8	3.0%	2.5%	0.0%	0.0%	8.29	<b>%</b> 9.1	%	11.	8%
13.	4%	7	.6%	7	7.1%	0.0%	0.0%	0.0%	7.19	% 7.5	%	13.	5%
11.	6%	9	.2%	8	3.2%	0.0%	0.0%	2.5%	8.09	8.8	%	12.2	2%
6.	4%	8	8.1%	10	).3%	8.2%	7.1%	8.0%	8.69	% 7.9	%	6.	9%
7.	6%	17	.3%	8	8.1%	9.1%	7.5%	8.8%	7.99	% 16.7	%	8.2	2%
25.	7%	7	.6%	6	5.5%	11.8%	13.5%	12.2%	6.99	% 8.2	%	26.4	4%

Tabla VII Distribución de Potencia 900 K 0% de vacíos AZTRAN, CASMO y Diferencia

Promedio 9.1%, Desviación Estándar 5.4%

La Tabla VII anterior muestra las distribuciones de potencia de AZTRAN v CASMO y la diferencia que existe entre ellas, en porcentaje. Los números en negro muestran que AZTRAN calculó la distribución de potencia más grande que CASMO, y al contrario los números en rojo indican que el cálculo de AZTRAN es más bajo, mostrando que la menor diferencia está en los pines centrales. Los picos de potencia se presentan en lugares similares.

La Figura 5 presenta la reactividad por vacíos tomada de PHYSOR 2002, la cual está aproximadamente en el rango de -1.7 y -1.0  $\%\Delta$ K/KK'. y la Tabla VIII muestra la diferencia en ppm y la reactividad de vacíos, de los resultados obtenidos entre AZTRAN y CASMO, así como de AZTRAN y SERPENT para condiciones de operación de 900 K y 40% de vacíos.

	AZTRAN	CASMO-	SERPENT2	Diferencia [pcm]		
		4		-		
Temperatura	K-inf	K-inf	K-inf	AZTRAN -	AZTRAN -	
[K]				CASMO	SERPENT	
900	1.02751	1.03469	1.03872	-718.40	-1121.40	
%ΔK/KK′	-1.986	-1.371	-1.693			

Tabla VIII Cálculo de la K-infinita 900 K con 40% de vacíos



Burnup(GWd/t) Figura 5 PHYSOR 2002: Reactividad por vacíos BWR UO2 900 K (0 - 40% de vacíos)

Diferencia											
1.386	1.261	1.287	1.466	1.454	1.466	1.286	1.26	1.385			
1.261	1.086	0.386	0.912	0.97	0.914	0.386	1.087	1.26			
1.287	0.386	0.772	0.37	0.943	0.376	0.787	0.386	1.286			
1.466	0.912	0.37	1.019	0	0	0.376	0.914	1.466			
1.454	0.97	0.943	0	0	0	0.943	0.97	1.454			
1.466	0.914	0.376	0	0	1.019	0.37	0.912	1.466			
1.286	0.386	0.787	0.376	0.943	0.37	0.772	0.386	1.287			
1.26	1.087	0.386	0.914	0.97	0.912	0.386	1.086	1.261			
1.385	1.26	1.286	1.466	1.454	1.466	1.287	1.261	1.386			
1.19	1.213	1.233	1.371	1.348	1.372	1.234	1.214	1.191			
1.213	1.241	0.427	0.976	1.028	0.978	0.429	1.246	1.213			
1.233	0.427	0.825	0.415	1.02	0.423	0.858	0.429	1.233			
1.371	0.976	0.415	1.107	0	0	0.423	0.978	1.37			
1.348	1.028	1.02	0	0	0	1.02	1.027	1.346			
1.372	0.978	0.423	0	0	1.107	0.415	0.975	1.369			
1.234	0.429	0.858	0.423	1.02	0.415	0.825	0.427	1.23			
1.214	1.246	0.429	0.978	1.027	0.975	0.427	1.239	1.21			
1.191	1.213	1.233	1.37	1.346	1.369	1.23	1.21	1.187			
19.6%	4.8%	5.4%	9.5%	10.6%	9.4%	5.2%	4.6%	19.4%			
4.8%	5.5%	4.1%	6.4%	5.8%	6.4%	4.3%	15.9%	4.7%			
5.4%	4.1%	5.3%	4.5%	7.7%	4.7%	7.1%	4.3%	5.3%			
9.5%	6.4%	4.5%	8.8%	0.0%	0.0%	4.7%	6.4%	9.6%			
10.6%	5.8%	7.7%	0.0%	0.0%	0.0%	7.7%	5.7%	10.8%			
9.4%	6.4%	4.7%	0.0%	0.0%	8.8%	4.5%	6.3%	9.7%			
5.2%	4.3%	7.1%	4.7%	7.7%	4.5%	5.3%	4.1%	5.7%			
4.6%	15.9%	4.3%	6.4%	5.7%	6.3%	4.1%	15.3%	5.1%			
19.4%	4.7%	5.3%	9.6%	10.8%	9.7%	5.7%	5.1%	19.9%			

Tabla IX Distribución de Potencia 900 K 40% de vacíos AZTRAN v CASMO y Diferencia

Promedio 6.9%, Desviación Estándar 4.4%

La tabla IX presenta los picos en los pines similares, pero la diferencia entre las distribuciones de potencia más pequeña se da en los pines que tienen gadolinia.

	AZTRAN	CASMO-4	SERPENT2	Diferencia [pcm]		
Temperatura	K-inf	K-inf	K-inf	AZTR	AZTRAN -	
[K]				AN -	SERPENT	
900	1.04891	1.04958	1.05731	-67.49	-840.49	
300	1.11605	1.10351	1.10420	1253.93	1184.93	
$\Delta K (HX)$	6.71	5.39	4.69	-	-	
%ΔK/KK'	5.74	4.66	4.02			

Tabla X Cálculo de la K-infinita 900K y 300K con 0% de vacíos

La Tabla X anterior muestra el  $\Delta K(HX)$  o exceso de reactividad (*Hot Excess*) y reactividad caliente a frío, que también se muestra en la Figura 6 que corresponde a los datos tomados de PHYSOR 2002, cuyo rango aproximado está entre 3.0 y 4.0 % $\Delta K/KK'$ .



Figura 6 PHYSOR 2002: BWR reactividad caliente (900 K) a frío (300 K) en 0% de vacíos

Tabla XI Distribución de Potencia 300K 0% de vacíos AZTRAN,	CASMO y
Diferencia	-

1.648	1.364	1.356	1.511	1.502	1.509	1.352	1.359	1.643
1.364	1.01	0.273	0.843	0.916	0.845	0.273	1.008	1.359
1.356	0.273	0.69	0.264	0.949	0.269	0.708	0.273	1.352
1.511	0.843	0.264	1.123	0	0	0.269	0.845	1.509
1.502	0.916	0.949	0	0	0	0.949	0.916	1.502
1.509	0.845	0.269	0	0	1.123	0.264	0.843	1.511
1.352	0.273	0.708	0.269	0.949	0.264	0.69	0.273	1.356
1.359	1.008	0.273	0.845	0.916	0.843	0.273	1.01	1.364
1.643	1.359	1.352	1.509	1.502	1.511	1.356	1.364	1.648
1.433	1.339	1.311	1.432	1.421	1.431	1.309	1.336	1.428
1.339	1.158	0.279	0.898	0.977	0.902	0.279	1.157	1.335
1.311	0.279	0.709	0.276	1.078	0.28	0.748	0.279	1.308
1.432	0.898	0.276	1.281	0	0	0.28	0.902	1.43
1.421	0.977	1.078	0	0	0	1.078	0.977	1.42
1.431	0.902	0.28	0	0	1.281	0.276	0.898	1.43
1.309	0.279	0.748	0.28	1.078	0.276	0.708	0.279	1.31
1.336	1.157	0.279	0.902	0.977	0.898	0.279	1.157	1.337
1.428	1.335	1.308	1.43	1.42	1.43	1.31	1.337	1.431

21.5%	2.5%	4.5%	7.9%	8.1%	7.8%	4.3%	2.3%	21.5%
2.5%	14.8%	0.6%	5.5%	6.1%	5.7%	0.6%	14.9%	2.4%
4.5%	0.6%	1.9%	1.2%	12.9%	1.1%	4.0%	0.6%	4.4%
7.9%	5.5%	1.2%	15.8%	0.0%	0.0%	1.1%	5.7%	7.9%
8.1%	6.1%	12.9%	0.0%	0.0%	0.0%	12.9%	6.1%	8.2%
7.8%	5.7%	1.1%	0.0%	0.0%	15.8%	1.2%	5.5%	8.1%
4.3%	0.6%	4.0%	1.1%	12.9%	1.2%	1.8%	0.6%	4.6%
2.3%	14.9%	0.6%	5.7%	6.1%	5.5%	0.6%	14.7%	2.7%
21.5%	2.4%	4.4%	7.9%	8.2%	8.1%	4.6%	2.7%	21.7%

Promedio 5.9%, Desviación Estándar 5.6%

En la Tabla XI, al igual que en los casos anteriores, los picos de potencia se dan en pines similares y las diferencias más pequeñas, son en los pines con gadolinia.

# 4.2. Celda de combustible con MOX para el PWR

Al igual que para el BWR, las secciones eficaces son generadas en dos grupos de energía con SERPENT-2, pero en este caso se utiliza la librería **JEFF-3.1**. El mallado del ensamble se muestra en la Figura 7:



Figura 7 Mallado del ensamble PWR MOX para AZTRAN 1.1

Los resultados que se muestran en este análisis son:

- K-infinita en caliente (900 K),
- Distribución de potencia en caliente,
- K-infinita en frío (300K),
- Distribución de potencia en frío.

En la Tabla XII están los resultados obtenidos a 900 K con los diferentes códigos:

	14		ilculo de la Is							
	AZTRAN CASMO SERPENT Diferencia [pcm]									
Temperatura	K-inf	K-inf	K-inf	AZTRAN v	AZTRAN V					
[K]				CASMO	SERPENT					
900	1.21027	1.16381	1.20869	4646.29	2524.49					

Tabla XII Cálculo de la K-infinita 900 K

La Figura 8, es tomada con datos de PHYSOR 2002 y corresponde a la Kinf a 900K (a 0 quemado); la K-inf se encuentra aproximadamente en un rango de 1.16 a 1.22.

Las cinco gráficas corresponden a los resultados reportados por los participantes indicados en la Tabla XIII. La tabla XIV presenta las distribuciones de potencia a 900 K y la diferencia entre AZTRAN CASMO-4.

ID	Organización	Código (Método)	Librería
Η	NFI	CASMO 4 (Prob. Colisión + Método	ENDF/B-V, V
		Características)	
Κ	SEPCO	SHETRAN (Método de las Características)	ENDF/B-BI
			(R3)
0	CIREPI	FLEXBURN (Ordenas discretas con malla	JENDL-3.2
		arbitrarias)	
E	KURRI	MVP-BURN (Monte Carlo – Energía Continua)	JENDL-3.2
Q	KAERI	HELIOS (Probabilidades de Colisión)	ENDF/B-VI
В	JAERI	SRAC (Probabilidades de Colisión)	JENDL-3.2

 Tabla XIII Lista de participantes en el benchmark y sus códigos



Figura 8 PHYSOR 2002: PWR MOX 900 K K-infinita

### Tabla XIV Distribución de Potencia 900 K AZTRAN v CASMO y Diferencia

0.741	0.71	0.939	0.912	0.911	0.917	0.915	0.915	0.919	0.915	0.915	0.917	0.911	0.912	0.939	0.71	0.741
0.71	0.957	0.914	1.042	1.05	0.927	1.053	1.054	0.929	1.054	1.053	0.927	1.05	1.042	0.914	0.957	0.71
0.939	0.914	1.047	1.057	1.066	0	1.061	1.062	0	1.062	1.061	0	1.066	1.057	1.047	0.914	0.939
0.912	1.042	1.057	0	1.066	1.06	1.04	1.041	1.06	1.041	1.04	1.06	1.066	0	1.057	1.042	0.912
0.911	1.05	1.066	1.066	1.047	1.059	1.04	1.041	1.06	1.041	1.04	1.059	1.047	1.066	1.066	1.05	0.911
0.917	0.927	0	1.06	1.059	0	1.06	1.06	0	1.06	1.06	0	1.059	1.06	0	0.927	0.917
0.915	1.053	1.061	1.04	1.04	1.06	1.042	1.043	1.061	1.043	1.042	1.06	1.04	1.04	1.061	1.053	0.915
0.915	1.054	1.062	1.041	1.041	1.06	1.043	1.045	1.065	1.045	1.043	1.06	1.041	1.041	1.062	1.054	0.915
0.919	0.929	0	1.06	1.06	0	1.061	1.065	0	1.065	1.061	0	1.06	1.06	0	0.929	0.919
0.915	1.054	1.062	1.041	1.041	1.06	1.043	1.045	1.065	1.045	1.043	1.06	1.041	1.041	1.062	1.054	0.915
0.915	1.053	1.061	1.04	1.04	1.06	1.042	1.043	1.061	1.043	1.042	1.06	1.04	1.04	1.061	1.053	0.915
0.917	0.927	0	1.06	1.059	0	1.06	1.06	0	1.06	1.06	0	1.059	1.06	0	0.927	0.917
0.911	1.05	1.066	1.066	1.047	1.059	1.04	1.041	1.06	1.041	1.04	1.059	1.047	1.066	1.066	1.05	0.911
0.912	1.042	1.057	0	1.066	1.06	1.04	1.041	1.06	1.041	1.04	1.06	1.066	0	1.057	1.042	0.912
0.939	0.914	1.047	1.057	1.066	0	1.061	1.062	0	1.062	1.061	0	1.066	1.057	1.047	0.914	0.939
0.71	0.957	0.914	1.042	1.05	0.927	1.053	1.054	0.929	1.054	1.053	0.927	1.05	1.042	0.914	0.957	0.71
0.741	0.71	0.939	0.912	0.911	0.917	0.915	0.915	0.919	0.915	0.915	0.917	0.911	0.912	0.939	0.71	0.741
0.803	0.754	0.986	0.946	0.937	0.936	0.932	0.933	0.932	0.933	0.932	0.937	0.938	0.947	0.987	0.755	0.805
0.754	0.991	0.938	1.053	1.056	0.927	1.05	1.051	0.927	1.051	1.05	0.928	1.057	1.053	0.939	0.992	0.755
0.986	0.938	1.059	1.06	1.064	0	1.05	1.046	0	1.046	1.05	0	1.065	1.061	1.06	0.939	0.987
0.946	1.053	1.06	0	1.06	1.048	1.022	1.025	1.042	1.025	1.023	1.049	1.061	0	1.061	1.053	0.947
0.937	1.056	1.064	1.06	1.039	1.037	1.02	1.019	1.034	1.02	1.021	1.037	1.04	1.061	1.065	1.057	0.938
0.936	0.927	0	1.048	1.037	0	1.034	1.031	0	1.031	1.034	0	1.037	1.049	0	0.928	0.937
0.932	1.05	1.05	1.022	1.02	1.034	1.014	1.017	1.032	1.017	1.014	1.034	1.021	1.023	1.05	1.05	0.932
0.933	1.051	1.046	1.025	1.019	1.031	1.017	1.017	1.029	1.017	1.017	1.031	1.02	1.025	1.046	1.051	0.933
0.932	0.927	0	1.042	1.034	1 021	1.032	1.029	1.020	1.029	1.032	1 021	1.034	1.042	0	0.927	0.932
0.933	1.051	1.046	1.025	1.02	1.031	1.01/	1.017	1.029	1.017	1.01/	1.031	1.019	1.025	1.046	1.051	0.933
0.932	1.05	1.05	1.023	1.021	1.034	1.014	1.01/	1.032	1.01/	1.014	1.034	1.02	1.022	1.05	1.05	0.952
0.957	0.920	1 065	1.049	1.057	1 027	1.034	1.051	1.024	1.051	1.034	1 027	1.037	1.048	1.064	1.057	0.930
0.938	1.057	1.005	1.001	1.04	1.037	1.021	1.02	1.034	1.019	1.02	1.037	1.039	1.00	1.004	1.057	0.957
0.947	0.030	1.001	1.061	1.001	1.049	1.025	1.025	1.042	1.025	1.022	1.040	1.00	1.06	1.00	0.039	0.940
0.967	0.939	0.030	1.001	1.005	0 0 28	1.05	1.040	0.027	1.040	1.05	0.027	1.004	1.00	0.039	0.958	0.960
0.755	0.392	0.939	0.947	0.038	0.920	0.032	0.033	0.927	0.033	0.032	0.927	0.037	0.946	0.930	0.754	0.754
0.805	0.755	0.987	0.947	0.938	0.937	0.932	0.933	0.932	0.933	0.932	0.936	0.937	0.946	0.986	0.754	0.803

6.2%	4.4%	4.7%	3.4%	2.6%	1.9%	1.7%	1.8%	1.3%	1.8%	1.7%	2.0%	2.7%	3.5%	4.8%	4.5%	6.4%
4.4%	3.4%	2.4%	1.1%	0.6%	0.0%	0.3%	0.3%	0.2%	0.3%	0.3%	0.1%	0.7%	1.1%	2.5%	3.5%	4.5%
4.7%	2.4%	1.2%	0.3%	0.2%	0.0%	1.1%	1.6%	0.0%	1.6%	1.1%	0.0%	0.1%	0.4%	1.3%	2.5%	4.8%
3.4%	1.1%	0.3%	0.0%	0.6%	1.2%	1.8%	1.6%	1.8%	1.6%	1.7%	1.1%	0.5%	0.0%	0.4%	1.1%	3.5%
2.6%	0.6%	0.2%	0.6%	0.8%	2.2%	2.0%	2.2%	2.6%	2.1%	1.9%	2.2%	0.7%	0.5%	0.1%	0.7%	2.7%
1.9%	0.0%	0.0%	1.2%	2.2%	0.0%	2.6%	2.9%	0.0%	2.9%	2.6%	0.0%	2.2%	1.1%	0.0%	0.1%	2.0%
1.7%	0.3%	1.1%	1.8%	2.0%	2.6%	2.8%	2.6%	2.9%	2.6%	2.8%	2.6%	1.9%	1.7%	1.1%	0.3%	1.7%
1.8%	0.3%	1.6%	1.6%	2.2%	2.9%	2.6%	2.8%	3.6%	2.8%	2.6%	2.9%	2.1%	1.6%	1.6%	0.3%	1.8%
1.3%	0.2%	0.0%	1.8%	2.6%	0.0%	2.9%	3.6%	0.0%	3.6%	2.9%	0.0%	2.6%	1.8%	0.0%	0.2%	1.3%
1.8%	0.3%	1.6%	1.6%	2.1%	2.9%	2.6%	2.8%	3.6%	2.8%	2.6%	2.9%	2.2%	1.6%	1.6%	0.3%	1.8%
1.7%	0.3%	1.1%	1.7%	1.9%	2.6%	2.8%	2.6%	2.9%	2.6%	2.8%	2.6%	2.0%	1.8%	1.1%	0.3%	1.7%
2.0%	0.1%	0.0%	1.1%	2.2%	0.0%	2.6%	2.9%	0.0%	2.9%	2.6%	0.0%	2.2%	1.2%	0.0%	0.0%	1.9%
2.7%	0.7%	0.1%	0.5%	0.7%	2.2%	1.9%	2.1%	2.6%	2.2%	2.0%	2.2%	0.8%	0.6%	0.2%	0.7%	2.6%
3.5%	1.1%	0.4%	0.0%	0.5%	1.1%	1.7%	1.6%	1.8%	1.6%	1.8%	1.2%	0.6%	0.0%	0.3%	1.1%	3.4%
4.8%	2.5%	1.3%	0.4%	0.1%	0.0%	1.1%	1.6%	0.0%	1.6%	1.1%	0.0%	0.2%	0.3%	1.2%	2.4%	4.7%
4.5%	3.5%	2.5%	1.1%	0.7%	0.1%	0.3%	0.3%	0.2%	0.3%	0.3%	0.0%	0.7%	1.1%	2.4%	3.4%	4.4%
6.4%	4.5%	4.8%	3.5%	2.7%	2.0%	1.7%	1.8%	1.3%	1.8%	1.7%	1.9%	2.6%	3.4%	4.7%	4.4%	6.2%
					-				· -		4 ~ 4					

Promedio 1.7%, Desviación Estándar 1.4%

	AZTRAN	CASMO	SERPENT	Diferencia [pcm]				
Temperatura	K-inf	K-inf	K-inf	AZTRAN -	AZTRAN -			
[K]				CASMO	SERPENT			
900	1.21027	1.16381	1.20869	4646	158			
300	1.2709	1.24568	1.27268	2524.50	-175.50			
$\%\Delta K$ (HX)	6.06	8.18	6.40	-	-			
%ΔK/KK'	3.94	5.65	4.16					

Tabla XV Cálculo de la K-infinita 900 K y 300 K

La Tabla XV muestra el  $\Delta K(HX)$  o exceso de reactividad (*Hot Excess*) y reactividad caliente a frío, que también se muestra en la Figura 9, que corresponde a los datos tomados de PHYSOR 2002, cuyo rango aproximado está entre 4.5 y 6.0 % $\Delta K/KK'$ .



Figura 9 PHYSOR 2002: PWR reactividad caliente (900 K) a frío (300 K)

## Tabla XVI Distribución de Potencia 300K AZTRAN, CASMO y Diferencia

0.777	0.738	0.947	0.915	0.917	0.925	0.923	0.924	0.928	0.924	0.923	0.925	0.917	0.915	0.947	0.738	0.777
0.738	0.969	0.917	1.023	1.036	0.944	1.041	1.043	0.947	1.043	1.041	0.944	1.036	1.023	0.917	0.969	0.738
0.947	0.917	1.03	1.049	1.063	0	1.057	1.059	0	1.059	1.057	0	1.063	1.049	1.03	0.917	0.947
0.915	1.023	1.049	0	1.065	1.058	1.03	1.032	1.06	1.032	1.03	1.058	1.065	0	1.049	1.023	0.915
0.917	1.036	1.063	1.065	1.04	1.059	1.032	1.034	1.061	1.034	1.032	1.059	1.04	1.065	1.063	1.036	0.917
0.925	0.944	0	1.058	1.059	0	1.061	1.063	0	1.063	1.061	0	1.059	1.058	0	0.944	0.925
0.923	1.041	1.057	1.03	1.032	1.061	1.036	1.038	1.064	1.038	1.036	1.061	1.032	1.03	1.057	1.041	0.923
0.924	1.043	1.059	1.032	1.034	1.063	1.038	1.039	1.067	1.039	1.038	1.063	1.034	1.032	1.059	1.043	0.924
0.928	0.947	0	1.06	1.061	0	1.064	1.067	0	1.067	1.064	0	1.061	1.06	0	0.947	0.928
0.924	1.043	1.059	1.032	1.034	1.063	1.038	1.039	1.067	1.039	1.038	1.063	1.034	1.032	1.059	1.043	0.924
0.923	1.041	1.057	1.03	1.032	1.061	1.036	1.038	1.064	1.038	1.036	1.061	1.032	1.03	1.057	1.041	0.923
0.925	0.944	0	1.058	1.059	0	1.061	1.063	0	1.063	1.061	0	1.059	1.058	0	0.944	0.925
0.917	1.036	1.063	1.065	1.04	1.059	1.032	1.034	1.061	1.034	1.032	1.059	1.04	1.065	1.063	1.036	0.917
0.915	1.023	1.049	0	1.065	1.058	1.03	1.032	1.06	1.032	1.03	1.058	1.065	0	1.049	1.023	0.915
0.947	0.917	1.03	1.049	1.063	0	1.057	1.059	0	1.059	1.057	0	1.063	1.049	1.03	0.917	0.947
0.738	0.969	0.917	1.023	1.036	0.944	1.041	1.043	0.947	1.043	1.041	0.944	1.036	1.023	0.917	0.969	0.738
0.777	0.738	0.947	0.915	0.917	0.925	0.923	0.924	0.928	0.924	0.923	0.925	0.917	0.915	0.947	0.738	0.777
0.824	0.782	0.979	0.933	0.928	0.932	0.925	0.924	0.929	0.924	0.925	0.932	0.928	0.933	0.979	0.782	0.824
0.782	0.998	0.942	1.038	1.044	0.95	1.042	1.04	0.946	1.04	1.042	0.95	1.044	1.038	0.942	0.998	0.782
0.979	0.942	1.05	1.054	1.067	0	1.052	1.05	0	1.05	1.052	0	1.067	1.054	1.05	0.942	0.979
0.933	1.038	1.054	0	1.068	1.052	1.016	1.019	1.042	1.019	1.016	1.052	1.068	0	1.054	1.038	0.933
0.928	1.044	1.067	1.068	1.035	1.046	1.02	1.014	1.036	1.014	1.02	1.046	1.035	1.068	1.067	1.044	0.928
0.932	0.95	0	1.052	1.046	0	1.042	1.042	0	1.042	1.042	0	1.046	1.052	0	0.95	0.932
0.925	1.042	1.052	1.016	1.02	1.042	1.014	1.017	1.036	1.017	1.014	1.042	1.02	1.016	1.052	1.042	0.925
0.924	1.04	1.05	1.019	1.014	1.042	1.01/	1.015	1.037	1.015	1.01/	1.042	1.014	1.019	1.05	1.04	0.924
0.929	0.946	1.05	1.042	1.036	1.042	1.030	1.03/	1 027	1.03/	1.030	1.042	1.030	1.042	1.05	0.946	0.929
0.924	1.04	1.05	1.019	1.014	1.042	1.017	1.015	1.037	1.015	1.017	1.042	1.014	1.019	1.05	1.04	0.924
0.923	0.05	1.052	1.010	1.02	1.042	1.014	1.017	1.050	1.017	1.014 1.042	1.042	1.02	1.010	1.052	1.042	0.923
0.932	1 044	1.067	1.052	1.040	1.046	1.042	1.042	1.036	1.042	1.042	1.046	1.040	1.052	1.067	1 044	0.932
0.920	1.044	1.007	1.000	1.055	1.040	1.02	1.014	1.030	1.014	1.02	1.040	1.055	1.000	1.007	1.044	0.920
0.955	0.942	1.054	1.054	1.000	1.052	1.010	1.019	1.042	1.019	1.010	1.052	1.000	1.054	1.054	0.942	0.955
0.782	0.942	0.942	1.034	1.007	0.95	1.032	1.03	0.946	1.03	1.052	0.95	1.007	1.034	0.942	0.942	0.782
0.824	0.782	0.979	0.933	0.928	0.932	0.925	0.924	0.929	0.924	0.925	0.932	0.928	0.933	0.979	0.782	0.762

4.7%	4.4%	3.2%	1.8%	1.1%	0.7%	0.2%	0.0%	0.1%	0.0%	0.2%	0.7%	1.1%	1.8%	3.2%	4.4%	4.7%
4.4%	2.9%	2.5%	1.5%	0.8%	0.6%	0.1%	.3%	0.1%	0.3%	0.1%	0.6%	0.8%	1.5%	2.5%	2.9%	4.4%
3.2%	2.5%	2.0%	0.5%	0.4%	0.0%	0.5%	0.9%	0.0%	0.9%	0.5%	0.0%	0.4%	0.5%	2.0%	2.5%	3.2%
1.8%	1.5%	0.5%	0.0%	0.3%	0.6%	1.4%	1.3%	1.8%	1.3%	1.4%	0.6%	0.3%	0.0%	0.5%	1.5%	1.8%
1.1%	0.8%	0.4%	0.3%	0.5%	1.3%	1.2%	2.0%	2.5%	2.0%	1.2%	1.3%	0.5%	0.3%	0.4%	0.8%	1.1%
0.7%	0.6%	0.0%	0.6%	1.3%	0.0%	1.9%	2.1%	0.0%	2.1%	1.9%	0.0%	1.3%	0.6%	0.0%	0.6%	0.7%
0.2%	0.1%	0.5%	1.4%	1.2%	1.9%	2.2%	2.1%	2.8%	2.1%	2.2%	1.9%	1.2%	1.4%	0.5%	0.1%	0.2%
0.0%	0.3%	0.9%	1.3%	2.0%	2.1%	2.1%	2.4%	3.0%	2.4%	2.1%	2.1%	2.0%	1.3%	0.9%	0.3%	0.0%
0.1%	0.1%	0.0%	1.8%	2.5%	0.0%	2.8%	3.0%	0.0%	3.0%	2.8%	0.0%	2.5%	1.8%	0.0%	0.1%	0.1%
0.0%	0.3%	0.9%	1.3%	2.0%	2.1%	2.1%	2.4%	3.0%	2.4%	2.1%	2.1%	2.0%	1.3%	0.9%	0.3%	0.0%
0.2%	0.1%	0.5%	1.4%	1.2%	1.9%	2.2%	2.1%	2.8%	2.1%	2.2%	1.9%	1.2%	1.4%	0.5%	0.1%	0.2%
0.7%	0.6%	0.0%	0.6%	1.3%	0.0%	1.9%	2.1%	0.0%	2.1%	1.9%	0.0%	1.3%	0.6%	0.0%	0.6%	0.7%
1.1%	0.8%	0.4%	0.3%	0.5%	1.3%	1.2%	2.0%	2.5%	2.0%	1.2%	1.3%	0.5%	0.3%	0.4%	0.8%	1.1%
1.8%	1.5%	0.5%	0.0%	0.3%	0.6%	1.4%	1.3%	1.8%	1.3%	1.4%	0.6%	0.3%	0.0%	0.5%	1.5%	1.8%
3.2%	2.5%	2.0%	0.5%	0.4%	0.0%	0.5%	0.9%	0.0%	0.9%	0.5%	0.0%	0.4%	0.5%	2.0%	2.5%	3.2%
4.4%	2.9%	2.5%	1.5%	0.8%	0.6%	0.1%	0.3%	0.1%	0.3%	0.1%	0.6%	0.8%	1.5%	2.5%	2.9%	4.4%
4.7%	4.4%	3.2%	1.8%	1.1%	0.7%	0.2%	0.0%	0.1%	0.0%	0.2%	0.7%	1.1%	1.8%	3.2%	4.4%	4.7%

Promedio 1.3%, Desviación

Estándar 1.1%

La Tabla XVI muestra las distribuciones de potencia que se obtuvieron a 300 K, así como la diferencia. Al igual que el caso en caliente, los picos se encuentran en pines similares y la diferencia entre ellos es más pequeña que para el caso del PWR.

### CONCLUSIONES

En el trabajo realizado, se muestra a la comunidad nuclear el desarrollo del proyecto AZTLAN, y sus códigos, exponiendo la capacidad que tienen éstos de resolver problemas que comúnmente se presentan en análisis y diseño de reactores, realizando comparaciones de resultados con códigos aceptados y utilizados por la comunidad internacional. De esta manera, se espera tener una retroalimentación de la misma comunidad, al exponer las virtudes y defectos de los códigos, considerando que se encuentra en una fase temprana del desarrollo.

Respecto a AZTRAN, actualmente tiene la limitación que le impide ser independiente de otros códigos: el cálculo de las secciones eficaces y no realizar el quemado del combustible. Por ello, no se pudieron realizar todos los ejercicios que pide el Benchmark, pero son buenos ejemplos para comprobar la confiabilidad del método que utiliza para realizar los cálculos; ya que como se pudo ver, los resultados de la K-infinita y las distribuciones de potencia se encuentran dentro del rango de los resultados que se obtienen con otros códigos, y en particular con CASMO-4, ya que AZTRAN es independiente de éste, a diferencia de SERPENT-2, con el cual se generaron las secciones eficaces para este estudio.

Comparando los resultados obtenidos en el BWR y PWR, se puede observar que el PWR muestra valores con menor diferencia entre CASMO y AZTRAN; esto puede deberse al

Julio Amhed Vallejo Quintero et al, Validación del código AZTRAN 1.1 con problemas Benchmark de reactores LWR mayor grado de heterogeneidad que presenta la celda de combustible del BWR, al utilizar más barras con diferente enriquecimiento dispuestas de manera dispersa, y, sobre todo, la presencia de las barras de gadolinia, que son altamente absorbedoras de neutrones térmicos y que ocasionan gradientes importantes de flujo neutrónico. Además, es notable que los mayores errores se encuentran en las esquinas, esto puede ser debido a que AZTRAN esté estimando incorrectamente las condiciones de frontera en las esquinas. Para trabajo futuro, se estarán probando las nuevas versiones del código en las cuales ya esté funcional la opción de rebalance, y posteriormente la incorporación de considerar la anisotropía, principalmente importante en regiones de alta dispersión. Además, se probará una ordenada discreta de mayor grado, un mallado más fino y/o un criterio de convergencia más estricto.

#### AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen el apoyo financiero recibido del proyecto estratégico No. 212602 (AZTLAN Platform) del Fondo Sectorial de Sustentabilidad Energética CONACYT - SENER.

#### REFERENCIAS

- Gómez T. A., Puente E. F., 2014, "AZTLAN Platform: Plataforma Mexicana para el Análisis y Diseño de Reactores Nucleares", XXV Congreso Anual de la Sociedad Nuclear Mexicana, del 31 de Agosto al 4 de Septiembre, Veracruz, México.
- Akio Yamamoto, Tadashi Ikehara, Takuya Ito, Etsuro Saji. "Benchmark Problem Suite for Reactor Physics Study of LWR Next Generation Fuels", *Journal of NUCLEAR SCIENCE and TECHNOLOGY*, Vol. 39, p. 900-912 (August 2002).
- Keisuke Okumura, Hironobu Unesaki, Takanori Kitada, Etsuro Saji, "BENCHMARK RESULTS OF BURN-UP CALCULATION FOR LWR NEX GENERATION FUELS". *PHYSOR 2002*, Seul, Korea (October 2002).
- Samuel Vargas, Guillermo Ibarra, José V. Xolocostli, Roberto Carlos. AZTRAN 1.1 AZTLAN TRANSPORT NEUTRONIC CODE, Manual de Usuario, AZTLAN PLATFORM, Ciudad de México, México (Febrero, 2015).
- 5. SERPENT, a Continuous-energy Monte Carlo Reactor Physics \_Burnup Calculation Code", http://montecarlo.vtt.fi (2016).
- 6. Dave Knott, Bengt H. Forssén, Malte Edenius. *CASMO-4 A Fuel Assembly Burnup Program Methodology*, STUDSVIK/SOA-95/2. Rev 0 Sept 1995