

Verificación del código AZNHEX v.1.4 con MCNP6 para diferentes casos de referencia

Juan Galicia-Aragón, Juan Luis François Lacouture, Guillermo Elías Bastida Ortiz
Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Ingeniería, Departamento de Sistemas Energéticos

*Av. Universidad 3000, Circuito Exterior s/n, Ciudad Universitaria, 04510 México, D.F.
jgaliciaa87@gmail.com; juan.luis.francois@gmail.com; gbo729@yahoo.com.mx*

Edmundo del Valle Gallegos

*Instituto Politécnico Nacional, Escuela Superior de Física y Matemáticas
Av. IPN s/n San Pedro Zacatenco, Ciudad de México, D.F., 07730, México
edmundo.delvalle@gmail.com.*

Resumen

Los códigos que conforman a la plataforma AZTLAN (AZTHECA, AZTRAN, AZKIND y AZNHEX) se encuentran actualmente en la fase de pruebas simulando gran variedad de ensambles y núcleos de reactores nucleares para comparar y validar los resultados obtenidos para un caso en particular, con códigos mundialmente usados en el área nuclear como es CASMO, SERPENT y MCNP. El objetivo de esta labor es continuar mejorando las versiones futuras de los códigos de la plataforma AZTLAN de modo que se puedan obtener resultados precisos y confiables para el usuario. Para probar la versión actual del código AZNHEX, se tomaron en cuenta 3 casos, siendo el primero la simulación de un ensamble de un reactor VVER-440; para el segundo caso, se simuló el ensamble de un reactor rápido refrigerado con helio y para el tercer caso se optó por retomar el caso del núcleo de un reactor rápido refrigerado con sodio, esto debido a que las versiones previas de AZNHEX no mostraban resultados adecuados y, además, presentaban una cantidad considerable de limitaciones. La comparación y validación de los resultados (factor de multiplicación de neutrones, potencia radial, flujo radial, potencia axial) para estos tres casos, se realizaron empleando el código MCNP6. Los resultados obtenidos muestran que esta versión de AZNHEX produce valores del factor de multiplicación de neutrones y de las distribuciones de flujo neutrónico y de potencia muy cercanos a los de MCNP6.

1. INTRODUCCIÓN

La verificación de los códigos pertenecientes a la plataforma AZTLAN es indispensable para lograr identificar cualquier aspecto que pueda limitar la correcta obtención de los resultados para una gama amplia de casos de prueba. Para esta labor, el grupo de usuarios tiene como objetivo simular gran variedad de ejercicios de prueba, como ensambles y núcleos de reactores nucleares con el fin de comparar y validar lo calculado con estos códigos con lo obtenido en códigos internacionalmente conocidos en el área nuclear como son MCNP, SERPENT, CASMO, entre otros. Dependiendo del análisis realizado, el grupo de usuarios debe de informar a los desarrolladores los avances obtenidos y las posibles limitaciones encontradas para que en

versiones futuras de los códigos de la plataforma AZTLAN, se obtengan resultados aún más confiables y precisos.

Actualmente se cuenta con la versión 1.4 del código de difusión AZNHEX y es necesario realizar diversas pruebas para analizar a profundidad los resultados finales y así garantizar su confiabilidad. Esto también es de suma importancia para las posibles sugerencias que puedan darse a los desarrolladores para hacer que las siguientes versiones de AZNHEX sean mejores. De igual manera, el archivo de entrada debe de ser comprensible y fácil de elaborar para que el usuario no tenga problema alguno para comprender la lógica en el diseño de un ensamble y/o núcleo de cualquier reactor nuclear.

2. CASOS CONSIDERADOS PARA LAS SIMULACIONES

Para probar a detalle la versión actual del código AZNHEX, se consideraron tres casos los cuales se mencionan a continuación. Esta versión aún necesita que se le importen datos como el coeficiente de difusión, la sección eficaz de remoción, la matriz de dispersión, etc para realizar las simulaciones. Esta información se obtuvo del código SERPENT v.2.1.28 [1].

2.1. Ensamble de un Reactor VVER-440

En primera instancia se consideró este caso por su simplicidad (ensamble de reactor térmico con 2 grupos de energía de los neutrones) y para analizar la respuesta del código cuando es necesario poner condiciones de reflexión. La Figura 1 muestra el ensamble simulado con MCNP6 [2], código de Monte Carlo usado para comparar y verificar los resultados.

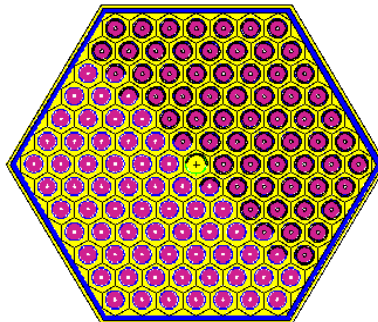


Figura 1. Ensamble de un reactor VVER-440

Para poder realizar una comparación más exacta, el ensamble se simuló sin canal y sin agua en los extremos ya que AZNHEX cuenta con esas limitaciones actualmente. Las características de los combustibles se muestran en la Tabla I. El agua tiene una temperatura de 600 K.

Tabla I. Características de los combustibles del ensamble de un reactor VVER-440

No. de combustibles	Composición (wt%)	Temperatura (K)	pitch (cm)
126	3.175 (U-235) 84.98 (U-238) 11.85 (O-16)	900	1.23

2.1.1. Cálculos de criticidad

La Tabla II presenta los resultados obtenidos del factor de multiplicación de neutrones (k_{inf}) y la diferencia relativa con respecto al valor calculado con MCNP6. Como se puede apreciar, existe una muy buena aproximación del resultado de la k_{inf} tomando en cuenta las modificaciones realizadas para que ambas simulaciones fueran lo más parecidas posible.

Tabla II. Valores de la k_{inf} obtenidos para el ensamble de un reactor VVER-440¹

	AZNHEX v1.4	MCNP6	pcm (respecto a MCNP6)
k-inf	1.31786	1.31493 +- 0.00026	-223

¹ Para la simulación con MCNP6 se usaron 20,000 historias de neutrones y 300 ciclos activos

2.1.2. Comparación de la potencia radial

La Figura 2 muestra los resultados de la potencia radial normalizada calculada con base en los valores obtenidos con MCNP6. Por otra parte, la Figura 3 presenta los resultados de la potencia radial calculados esta vez con AZNHEX. Posteriormente, en la Figura 4, se muestran los errores relativos con respecto a lo obtenido con MCNP6 para cada barra de combustible.

						0.991	0.988	0.994	0.991	0.995	0.990	0.991
					0.989	0.993	0.998	0.995	0.996	0.998	0.991	0.993
				0.987	0.993	0.998	1.000	0.995	0.997	1.001	0.993	0.987
			0.988	0.990	0.998	1.004	1.002	1.008	1.004	0.996	0.997	0.991
		0.998	0.992	0.997	1.003	1.015	1.020	1.018	1.004	0.996	0.993	0.994
	0.992	0.989	0.999	1.003	1.024	1.062	1.060	1.020	1.005	0.997	0.990	0.989
0.993	0.990	0.993	1.000	1.013	1.063	...	1.059	1.019	0.999	0.998	0.996	0.994
0.991	0.993	0.997	1.003	1.021	1.060	1.060	1.020	0.997	0.996	0.992	0.997	
0.992	0.991	0.998	1.001	1.020	1.021	1.016	0.995	0.998	0.991	0.992		
0.989	0.992	0.998	1.002	1.006	1.002	1.000	0.992	0.993	0.988			
0.987	0.992	0.991	0.992	0.995	0.998	0.996	0.991	0.990				
0.990	0.992	0.989	0.986	0.994	0.994	0.991	0.990					
0.995	0.993	0.992	0.990	0.991	0.986	0.992						

Figura 2. Potencia radial para el ensamble de un reactor VVER-440 (MCNP6)

						0.993	0.994	0.994	0.994	0.994	0.993	0.993
					0.994	0.994	0.995	0.995	0.995	0.995	0.994	0.993
				0.994	0.995	0.996	0.997	0.998	0.997	0.996	0.995	0.994
			0.994	0.995	0.998	1.001	1.003	1.003	1.000	0.997	0.995	0.994
		0.994	0.995	0.998	1.004	1.012	1.016	1.011	1.003	0.998	0.995	0.994
	0.994	0.995	0.998	1.004	1.017	1.041	1.039	1.016	1.003	0.997	0.995	0.994
0.993	0.994	0.996	1.001	1.012	1.041	...	1.041	1.012	1.001	0.996	0.994	0.993
0.994	0.995	0.997	1.003	1.016	1.039	1.041	1.017	1.004	0.998	0.995	0.994	
0.994	0.995	0.998	1.003	1.011	1.016	1.012	1.004	0.998	0.995	0.994		
0.994	0.995	0.997	1.000	1.002	1.003	1.001	0.998	0.995	0.994			
0.994	0.995	0.996	0.997	0.998	0.997	0.996	0.995	0.994				
0.993	0.994	0.995	0.995	0.995	0.995	0.994	0.994					
0.993	0.993	0.994	0.994	0.994	0.994	0.993						

Figura 3. Potencia radial para el ensamble de un reactor VVER-440 (AZNHEX)

						-0.20	-0.62	-0.03	-0.31	0.14	-0.32	-0.18	
						-0.54	-0.13	0.30	0.00	0.06	0.29	-0.33	0.05
					-0.69	-0.23	0.19	0.26	-0.32	0.02	0.52	-0.25	-0.73
				-0.61	-0.53	-0.03	0.35	-0.09	0.48	0.36	-0.13	0.16	-0.34
		0.45	-0.35	-0.13	-0.11	0.30	0.41	0.72	0.10	-0.16	-0.23	-0.05	
	-0.18	-0.59	0.13	-0.12	0.68	1.99	1.94	0.43	0.24	-0.03	-0.53	-0.49	
-0.03	-0.36	-0.29	-0.07	0.10	2.08	...	1.71	0.70	-0.21	0.20	0.21	0.15	
-0.30	-0.18	-0.04	0.00	0.45	1.98	1.83	0.27	-0.68	-0.16	-0.34	0.32		
-0.18	-0.43	0.03	-0.25	0.91	0.51	0.44	-0.88	-0.01	-0.43	-0.17			
-0.47	-0.26	0.14	0.15	0.36	-0.06	-0.11	-0.56	-0.18	-0.59				
-0.70	-0.31	-0.54	-0.45	-0.31	0.08	-0.01	-0.41	-0.43					
-0.33	-0.16	-0.60	-0.90	-0.14	-0.12	-0.34	-0.36						
0.23	-0.04	-0.24	-0.36	-0.31	-0.81	-0.07							

Figura 4. Errores relativos (%) respecto a MCNP6 para la potencia radial

Analizando la Figura 4, vemos la precisión con la que AZNHEX obtiene los valores de potencia en cada uno de los combustibles para este caso. Las diferencias más altas con respecto a MCNP6 se encuentran en la zona central, sin embargo, éstos no pasan del 2%, por lo que se concluye que los resultados que AZNHEX proporciona al usuario para la potencia radial son muy acertados.

2.1.3. Comparación del flujo radial

La Figura 5 muestra los valores del flujo radial normalizado con base en los resultados obtenidos con MCNP6. La Figura 6 presenta los resultados del flujo radial calculados con AZNHEX. Posteriormente, en la Figura 7, se muestran los errores relativos con respecto a lo obtenido con MCNP6 para cada combustible.

						0.998	0.998	1.000	1.001	1.000	0.997	0.999
					0.998	0.998	1.001	1.001	1.000	0.999	0.998	0.999
				0.999	0.999	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	0.999	0.998
			1.000	0.999	0.999	1.001	1.000	1.001	1.001	1.001	0.999	1.000
		1.000	0.998	0.999	0.999	1.001	1.000	1.002	1.001	1.000	1.000	1.001
0.998	1.000	0.998	0.999	0.999	1.001	1.004	1.006	1.003	1.001	1.000	1.000	0.999
0.999	0.998	0.998	1.000	1.001	1.006	1.010	1.006	1.003	1.000	0.999	0.999	0.999
0.999	0.998	0.999	0.999	1.002	1.005	1.005	1.002	1.002	1.000	0.998	1.001	
0.999	0.998	0.998	0.999	1.002	1.001	1.002	1.000	1.000	0.999	1.000		
0.999	1.000	1.000	0.999	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	0.999			
0.999	1.000	0.999	0.998	1.000	0.999	0.999	0.999	0.999				
0.999	0.999	0.996	0.998	1.000	0.999	0.999	1.000					
1.000	1.001	0.999	1.000	0.999	0.998	1.001						

Figura 5. Flujo radial para el ensamble de un reactor VVER-440 (MCNP6)

						0.999	0.999	0.999	0.999	0.999	0.999	0.999
					0.999	0.999	0.999	0.999	0.999	0.999	0.999	0.999
				0.999	0.999	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	0.999	0.999
			0.999	0.999	1.000	1.001	1.002	1.001	1.000	1.000	0.999	0.999
		0.999	0.999	1.000	1.000	1.002	1.005	1.005	1.002	1.000	1.000	0.999
0.999	0.999	0.999	1.000	1.001	1.005	1.011	1.005	1.001	1.000	0.999	0.999	0.999
0.999	0.999	1.000	1.000	1.002	1.005	1.005	1.002	1.000	1.000	0.999	0.999	
0.999	0.999	1.000	1.000	1.001	1.002	1.001	1.000	1.000	0.999	0.999		
0.999	0.999	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	0.999	0.999			
0.999	0.999	0.999	1.000	1.000	1.000	0.999	0.999	0.999				
0.999	0.999	0.999	0.999	0.999	0.999	0.999	0.999					
0.999	0.999	0.999	0.999	0.999	0.999	0.999						

Figura 6. Flujo radial para el ensamble de un reactor VVER-440 (AZNHEX)

								-0.07	-0.08	0.10	0.18	0.12	-0.17	-0.02					
								-0.06	-0.10	0.15	0.19	0.14	0.04	-0.07	0.03				
							-0.02	0.01	0.07	0.02	-0.05	-0.03	0.12	-0.01	-0.13				
							0.05	-0.04	-0.02	-0.13	-0.01	0.09	0.01	0.09	-0.02	0.06			
							0.05	-0.10	-0.08	-0.06	-0.02	-0.15	0.14	0.05	-0.04	0.14	0.21		
							0.14	-0.11	-0.15	-0.07	-0.07	-0.05	0.05	0.11	0.12	0.00	0.13	0.03	
							-0.08	-0.05	-0.11	-0.03	0.00	0.14	-0.06	0.12	0.18	0.04	-0.01	0.03	0.00
							-0.04	-0.11	-0.11	-0.10	0.04	0.03	0.03	0.02	0.18	-0.03	-0.06	0.18	
							0.00	-0.14	-0.17	-0.06	0.13	-0.06	0.10	0.01	-0.03	-0.01	0.09		
							-0.01	0.08	0.03	-0.05	-0.04	0.02	0.01	0.00	0.13	-0.04			
							-0.02	0.10	-0.04	-0.20	-0.03	-0.07	0.05	0.05	0.05				
							-0.03	0.03	-0.26	-0.06	0.10	0.01	-0.02	0.06					
							0.08	0.22	0.04	0.13	0.00	-0.05	0.22						

Figura 7. Errores relativos (%) respecto a MCNP6 para el flujo radial

Según lo calculado y presentado en la Figura 7, los resultados de AZNHEX para el flujo radial son muy precisos, contando con errores menores al 0.3 %. Esto deja ver que si el usuario desea simular el ensamble de un reactor térmico, sin duda obtendrá resultados altamente confiables.

2.2. Ensamble de un Reactor Rápido Refrigerado con Gas (GFR)

Para el siguiente caso, se decidió simular nuevamente un ensamble pero esta vez de un reactor rápido refrigerado con helio. Para la simulación del ensamble en AZNHEX, se usaron 7 grupos de energía de acuerdo a lo reportado en la referencia 3. La Figura 8 muestra el ensamble de este reactor simulado en MCNP6 y AZNHEX.

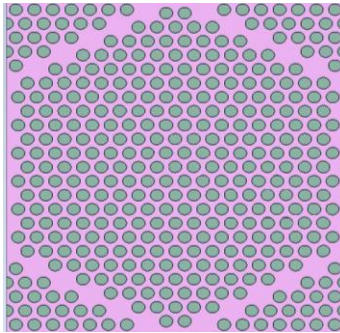


Fig.8 Ensamble de un reactor rápido refrigerado con helio

Las características de los combustibles en este ensamble se muestran en la Tabla III. La temperatura del helio se fijó en 900 K.

Tabla III. Características de los combustibles de un ensamble del GFR simulado

No. de combustibles	Composición (at/b-cm)		Temperatura (K)	pitch (cm)
307	5.42E-05 (U-235)	2.14E-02 (U-238)	1200	1.29
	1.70E-04 (Np-237)	8.33E-05 (Pu-238)		
	1.51E-03 (Pu-239)	7.86E-04 (Pu-240)		
	3.10E-04 (Pu-241)	2.38E-04 (Pu-242)		
	1.43E-04 (Am-241)	5.93E-05 (Am-243)		
	1.96E-05 (Cm-244)	4.95E-02 (O-16)		

2.2.1. Cálculos de criticidad

La Tabla IV presenta los resultados obtenidos del factor de multiplicación de neutrones (k_{inf}) y la diferencia relativa con respecto al valor calculado con MCNP6. Observando la tabla, se puede ver que el valor de la k_{inf} calculada con AZNHEX, es muy cercano al que se obtiene con el código de Monte Carlo teniendo una diferencia relativa muy pequeña.

Tabla IV. Valores de la k_{inf} obtenidos para el ensamble del GFR²

	AZNHEX v1.4	MCNP6	pcm (respecto a MCNP6)
k-inf	1.08149	1.08033 +- 0.00032	-107

² Para la simulación con MCNP6 se usaron 10,000 historias de neutrones y 230 ciclos activos

2.2.2. Comparación de la potencia radial

La Figura 9 muestra los resultados de la potencia radial normalizada calculada con base en los valores obtenidos con MCNP6. Por otra parte, la Figura 10 presenta los resultados de la potencia radial calculados con AZNHEX. Después, en la Figura 11 se muestran los errores relativos con respecto a lo obtenido con MCNP6 para cada barra de combustible.

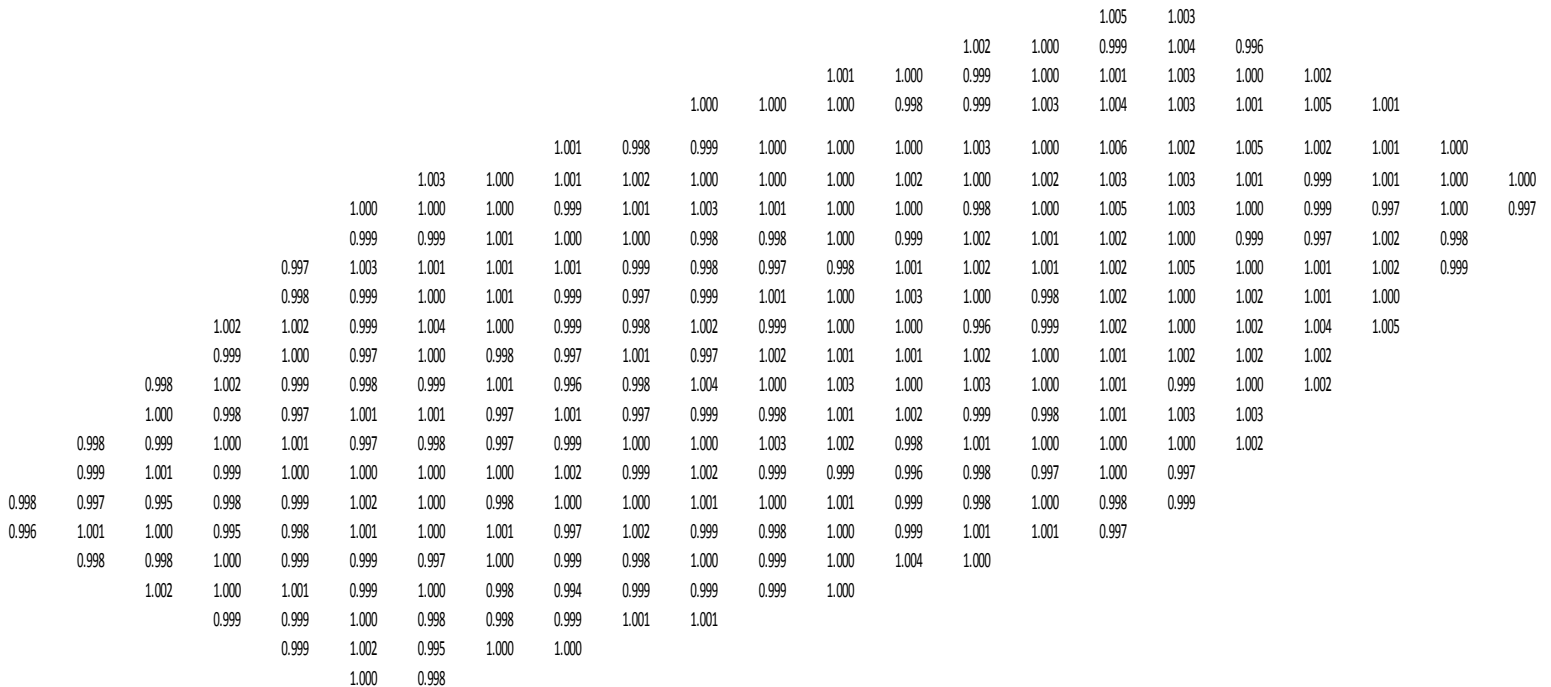


Figura 9. Potencia radial para el ensamble del GFR (MCNP6)

AZNHEX. Posteriormente, en la Figura 14, se muestran los errores relativos con respecto a lo obtenido con MCNP6.

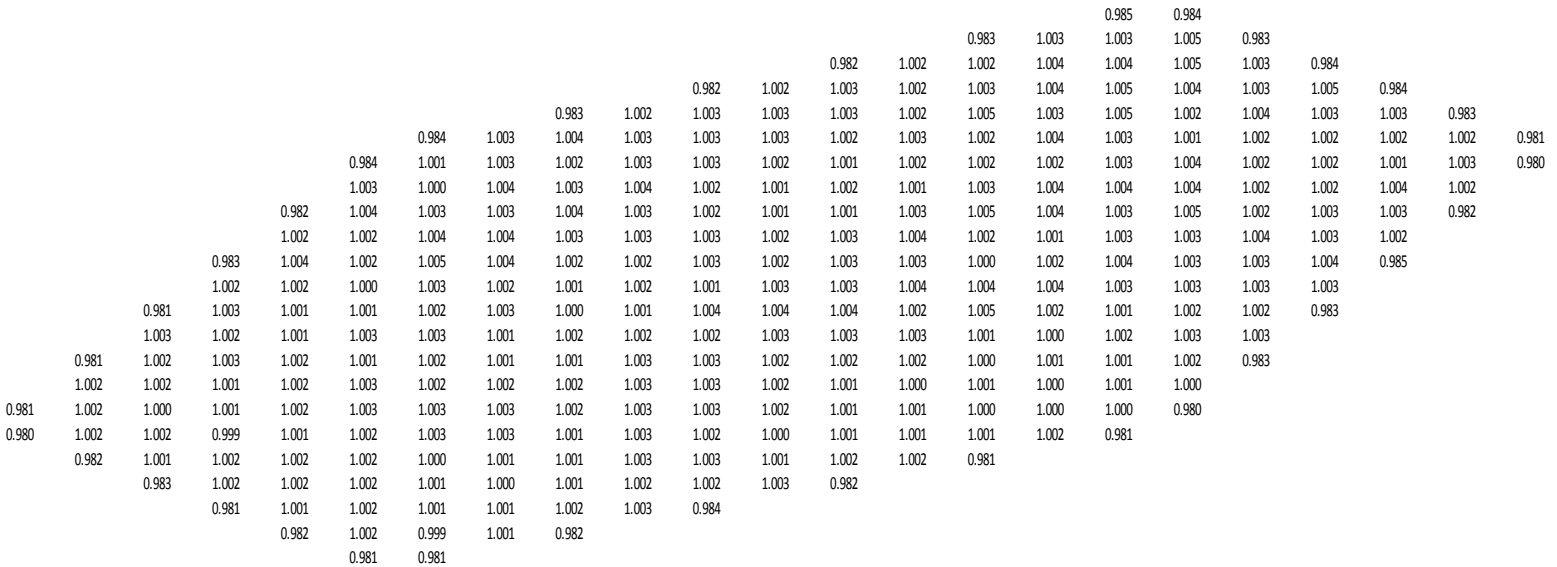


Figura 12. Flujo radial para el ensamble del GFR (MCNP6)

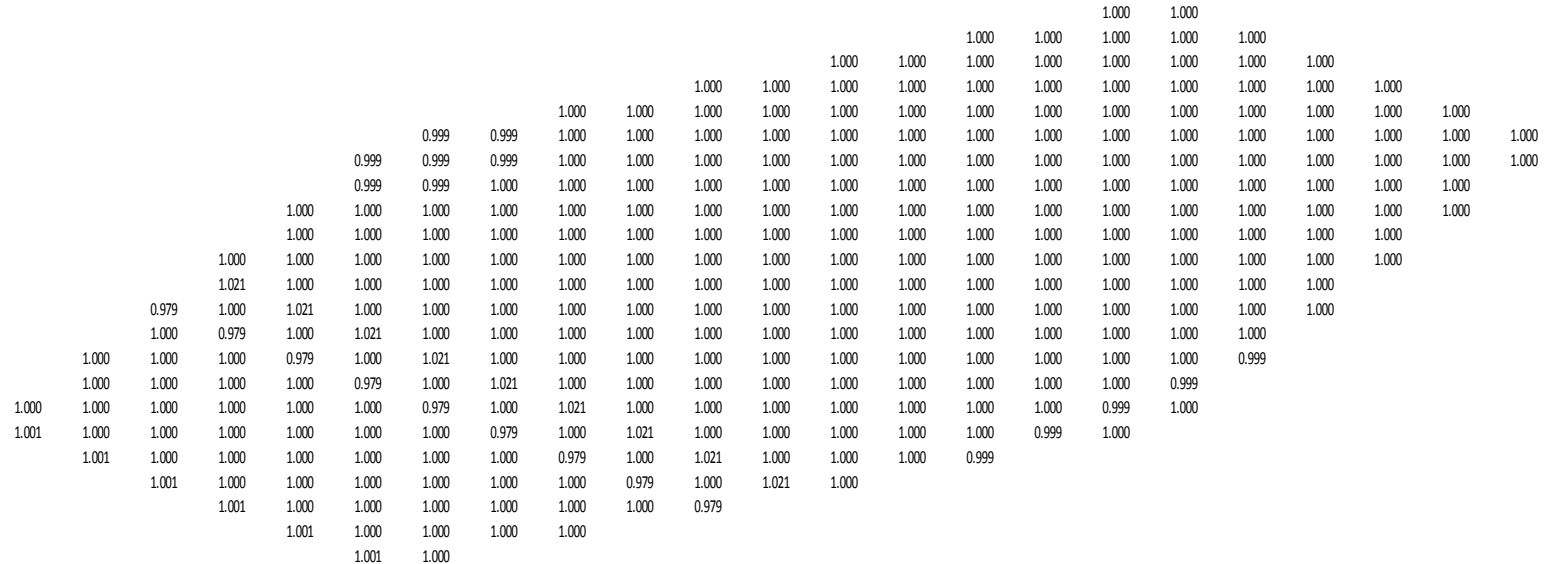


Figura 13. Flujo radial para el ensamble del GFR (AZNHEX)

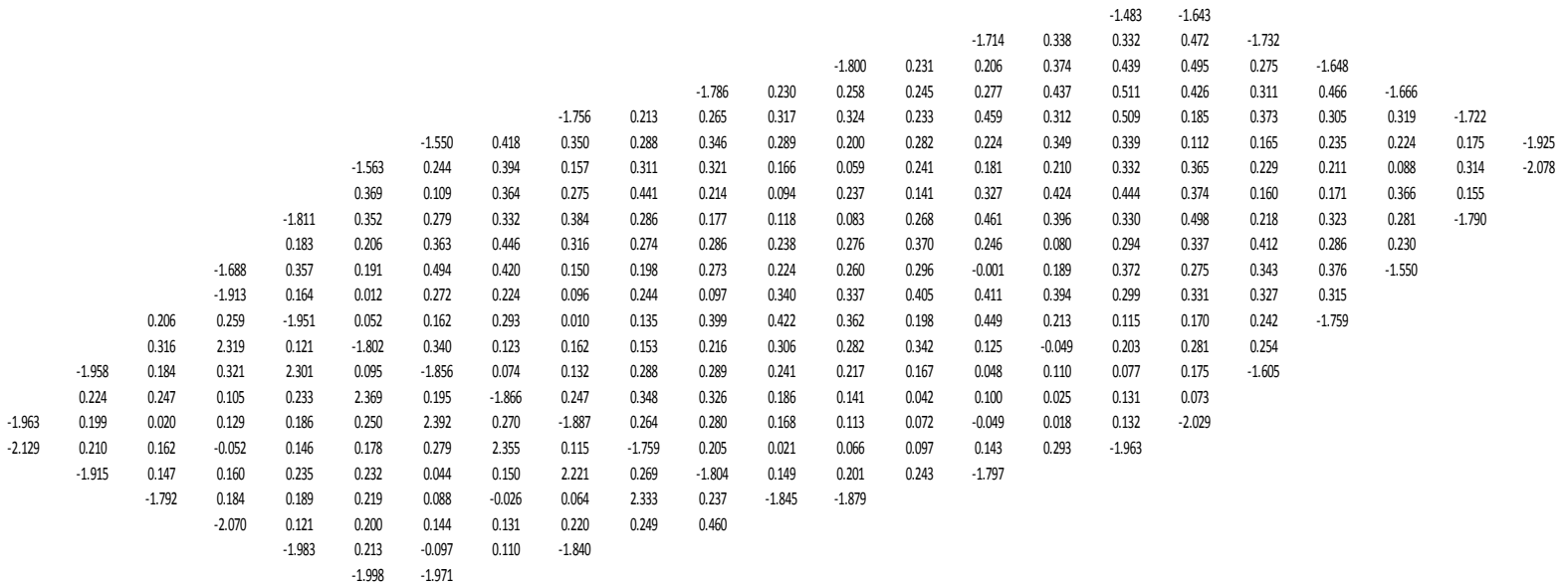


Figura 14. Errores Relativos (%) respecto a MCNP6 para el flujo radial

Según lo mostrado en la Figura 14, los valores del flujo radial para este caso obtenidos con AZNHEX también son muy precisos; los errores, en general, son menores al 3%. Con estos resultados se puede ver que la simulación de un ensamble de un reactor rápido proporciona al usuario valores finales muy confiables.

2.3. Núcleo de un Reactor Rápido Refrigerado con Sodio

Este caso ya se había analizado con la primera versión de AZNHEX, sin embargo, los resultados obtenidos con esa versión contaban con diferencias significativas al compararlos con los calculados con MCNP; además, tenía limitaciones que impedían analizar el caso de manera detallada [4]. Las características de este reactor se presentan en la Tabla V y en la Figura 15 se muestra el núcleo simulado. Como se puede observar, este núcleo cuenta con reflectores radiales (y axiales) de acero; además, el caso se consideró con siete ensambles de acero reemplazando el lugar de las barras de control. Al igual que para el caso del ensamble del GFR, para la simulación en AZNHEX se utilizaron 7 grupos de energía de acuerdo a los reportado en la referencia 3.

Tabla V. Características de los elementos del núcleo del reactor

Materiales	Enriquecimiento (at%)	Temperatura (K)	Ensambls
Combustibles (zona 1)	9.5	1200	18
Combustibles (zona 2)	14.25	1200	36
Combustibles (cobertor)	0.35	1200	66
Acero	---	600	97
Sodio	---	600	---

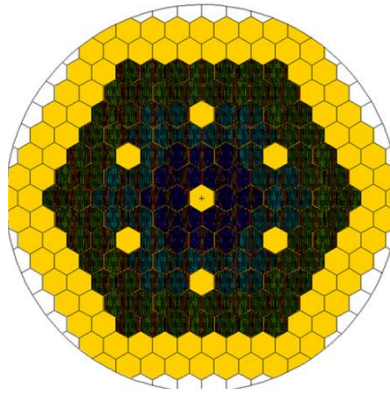


Figura 15. Núcleo del reactor rápido refrigerado con sodio

2.3.1. Cálculos de criticidad

La Tabla VI presenta los resultados obtenidos del factor de multiplicación de neutrones (k_{eff}) y la diferencia relativa con respecto al valor calculado con MCNP6. Al igual que en los casos anteriores, se puede ver en la Tabla VI que el valor de la k_{eff} calculada con AZNHEX presenta una aproximación bastante aceptable teniendo una diferencia de reactividad respecto a MCNP6 de aproximadamente 358 pcm.

Tabla VI. Valores de la k_{eff} obtenidos para el núcleo simulado³

	AZNHEX v1.4	MCNP6	pcm (respecto a MCNP6)
k-eff	1.04107	1.03736 +- 0.00028	-358

³ Para la simulación con MCNP6 se usaron 50,000 historias de neutrones y 100 ciclos activos

Como ya se había mencionado, AZNHEX cuenta con la opción para usar condiciones de reflexión tipo espejo en las fronteras que el usuario defina; esta opción se empleó nuevamente simulando un cuarto del núcleo descrito en este caso. Esto se consideró para analizar los resultados que el código proporciona al usuario cuando se opta por simular parcialmente un núcleo, especialmente cuando se tiene una gran cantidad de ensambles o bien si el núcleo a analizar presenta una gran complejidad. La Tabla VII muestra la comparación entre el valor del factor de multiplicación de neutrones mostrado en la Tabla VI y el obtenido al usar condiciones de reflexión.

Tabla VII. Comparación del factor de multiplicación de neutrones

	AZNHEX v1.4 (núcleo completo)	AZNHEX v1.4 (cuarto de núcleo)
valor de k	1.04107	1.04107

Como puede apreciarse en la tabla anterior, la condición de reflexión cumple con su función perfectamente si el usuario desea simular sólo parte de un núcleo. Esto por supuesto sólo es posible si el núcleo presenta simetría, de lo contrario, será necesario simularlo en su totalidad.

2.3.2. Comparación de la potencia radial

La Figura 16 muestra los resultados de la potencia radial normalizada por ensamble para un cuarto de núcleo, calculada con base en los valores obtenidos con MCNP6. Después, la Figura 17 presenta los resultados de la potencia radial por ensamble también para un cuarto de núcleo calculados con AZNHEX. Posteriormente, en la Figura 18 se muestran los errores relativos con respecto a lo obtenido con MCNP6. Los colores en cada una de las figuras ayudan a identificar cada zona del núcleo (ver Figura 15).

				0.073	0.105	0.128	0.134	0.127	0.104	0.072
			0.107	0.189	0.265	0.286	0.283	0.264	0.186	
		0.127	0.268	1.492	1.784	...	1.775	1.473		
	0.133	0.285	1.794	2.336	2.470	2.453	2.309			
		...	2.475	1.876	1.891	1.873				
			1.897	1.918	1.915					
				...						

Figura 16. Potencia radial cuarto de núcleo (MCNP6)

				0.074	0.106	0.127	0.132	0.125	0.102	0.069
			0.108	0.194	0.270	0.290	0.290	0.266	0.185	
		0.131	0.275	1.474	1.768	...	1.760	1.453		
	0.137	0.297	1.773	2.320	2.469	2.466	2.317			
		...	2.459	1.902	1.921	1.904				
			1.918	1.940	1.940					
				...						

Figura 17. Potencia radial cuarto de núcleo (AZNHEX)

				-1.383	-0.788	0.619	1.245	1.415	2.094	3.618
			-0.958	-2.588	-1.881	-1.352	-2.635	-0.617	0.371	
		-2.903	-2.536	1.184	0.917	...	0.829	1.376		
	-3.312	-4.363	1.181	0.691	0.056	-0.510	-0.340			
		...	0.693	-1.394	-1.591	-1.679				
			-1.127	-1.147	-1.288					
				...						

Figura 18. Errores relativos (%) respecto a MCNP6 para la potencia radial

Apreciando la Figura 18, vemos una aproximación acertada de los resultados obtenidos con AZNHEX. Las diferencias más altas se localizan en las orillas, sin embargo, todas cuentan con valores menores al 5%. La zona intermedia (zona 2), por otra parte, es la que cuenta con los resultados más acertados.

2.3.3. Comparación de la potencia axial

A diferencia de los casos anteriores donde se consideró únicamente dos dimensiones, el núcleo simulado y presentado en este apartado cuenta con una altura total de 300 cm tomando en cuenta los reflectores axiales. La zona activa tiene una altura de 100 cm. La distribución de potencia axial obtenida con MCNP6 y con AZNHEX para algunos ensambles dependiendo su localización se muestra en las siguientes figuras. De igual manera, los datos que se obtuvieron con ambos códigos se presentan en las siguientes tablas.

La Figura 19 muestra la ubicación del ensamble donde la distribución de potencia axial fue calculada. La Tabla VIII muestra los valores de la potencia en cada nodo considerado (8 nodos en total). Posteriormente, la Figura 20 muestra la distribución de la potencia obtenida con ambos códigos.

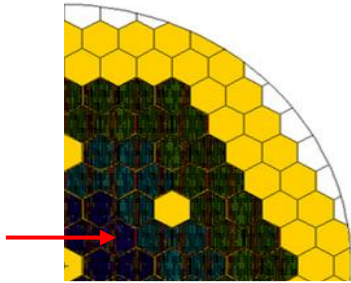


Figura 19. Localización del ensamble de interés

Tabla VIII. Valores de la potencia en cada nodo

MCNP6	AZNHEX_v1.4	Error rel. (%)
1.588	1.678	-5.689
1.954	2.007	-2.694
2.195	2.242	-2.117
2.339	2.363	-0.995
2.354	2.363	-0.381
2.199	2.242	-1.913
1.941	2.007	-3.389
1.596	1.678	-5.166

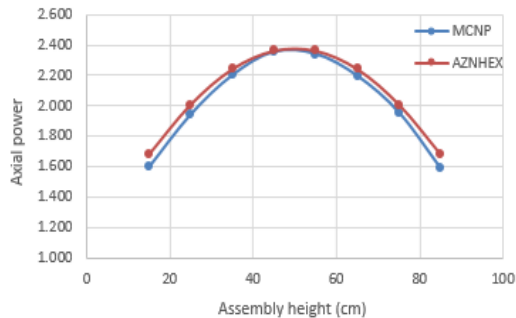


Figura 20. Distribución de la potencia axial en el ensamble de interés

La distribución de la potencia axial para este ensamble ubicado en la zona 1 es claramente el esperado teniendo el valor más alto en la parte media del ensamble (50 cm). Como puede verse en la Tabla VIII y en la Figura 19, tanto MCNP como AZNHEX arrojan resultados muy similares, especialmente en la zona intermedia donde los errores son incluso menores al 1%.

Tal como se realizó para el ensamble de la zona 1, la Figura 21 muestra la ubicación del ensamble donde la distribución de potencia axial fue calculada. Los datos obtenidos para este ensamble en cada nodo se presentan en la Tabla IX y la distribución de la potencia obtenida con ambos códigos se muestra en la Figura 22.

Tabla IX. Valores de la potencia en cada nodo

MCNP6	AZNHEX_v1.4	Error rel. (%)
1.501	1.548	-3.084
1.860	1.845	0.829
2.102	2.057	2.131
2.228	2.167	2.729
2.232	2.167	2.920
2.106	2.057	2.304
1.854	1.845	0.529
1.507	1.548	-2.722

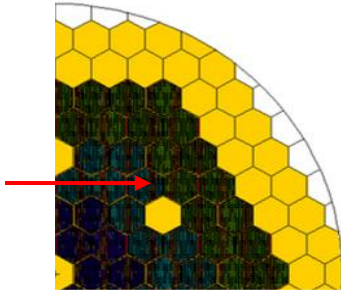


Figura 21. Localización del ensamblaje de interés

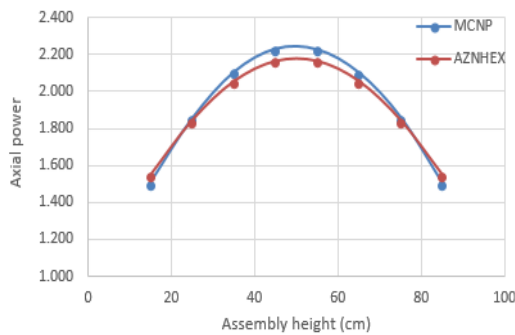


Figura 22. Distribución de la potencia axial en el ensamblaje de interés

Como se aprecia en la figura anterior, los valores obtenidos con AZNHEX en la zona intermedia para este ensamblaje son un poco menores comparados con los que arroja MCNP; esto puede apreciarse también en la Tabla IX. Pese a esto, la distribución de potencia en ambos códigos resulta con la misma tendencia tal como sucedió para el ensamblaje de la zona 1, teniendo el valor más alto en la parte media del ensamblaje (50 cm).

La Figura 23 muestra la ubicación del ensamblaje donde la distribución de potencia axial fue calculada; los valores obtenidos en cada nodo se presentan en la Tabla X y en la Figura 24 se muestra la distribución de potencia obtenida con ambos códigos.

Tabla X. Valores de la potencia en cada nodo

MCNP6	AZNHEX_v1.4	Error rel. (%)
0.108	0.111	-3.552
0.123	0.127	-3.777
0.137	0.140	-2.224
0.143	0.147	-2.824
0.144	0.147	-1.996
0.134	0.140	-4.115
0.123	0.127	-3.576
0.106	0.111	-4.906

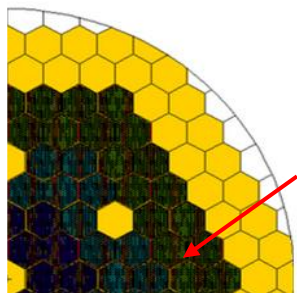


Figura 23. Localización del ensamblaje de interés

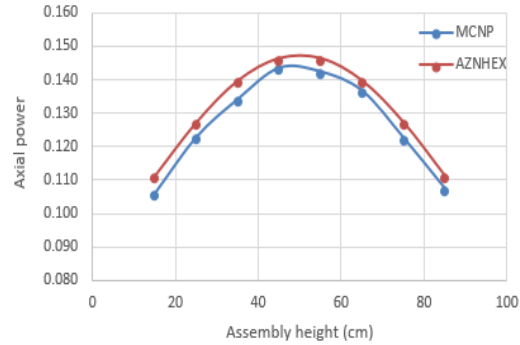


Figura 24. Distribución de la potencia axial en el ensamble de interés

Comparando los resultados obtenidos en este ensamble con los mostrados anteriormente, vemos que la diferencia entre los valores calculados con MCNP y AZNHEX es más notoria; pese a esto, la aproximación de los resultados de AZNHEX es aún muy acertada tal como puede verse en la Tabla X. El comportamiento de la potencia también es el esperado y ya que este ensamble se localiza en la zona del cobertor (ver Figura 23), los valores de la potencia axial son menores a los que se obtuvieron en los ensambles localizados en la zona 1 y 2.

El código AZNHEX también calcula la distribución de potencia axial promedio en todo el núcleo simulado, por lo que este resultado también fue comparado con lo que se obtiene con MCNP6. La Tabla XI muestra los valores de la potencia en cada nodo (8 nodos) y la Figura 25 muestra la distribución axial de potencia obtenida con ambos códigos.

Tabla XI. Valores de la potencia en cada nodo

MCNP6	AZNHEX_v1.4	Error rel. (%)
0.869	0.875	-0.733
1.065	1.043	2.045
1.205	1.164	3.418
1.281	1.226	4.278
1.282	1.226	4.342
1.206	1.164	3.521
1.066	1.043	2.154
0.871	0.875	-0.489

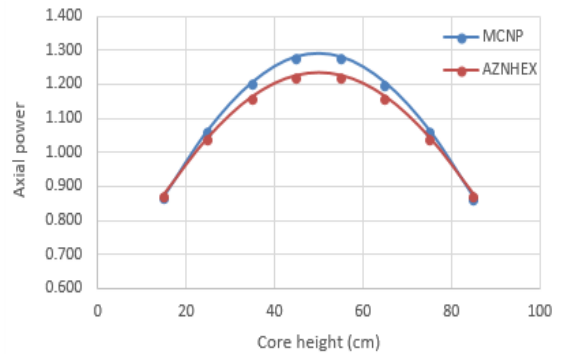


Fig. 25. Distribución de la potencia axial en el núcleo

Analizando la figura anterior, se puede observar que la distribución axial de potencia obtenida con AZNHEX presenta una buena aproximación a la obtenida con MCNP6. Algunos valores en la zona media son claramente menores tal como puede verse también en la Tabla XI; pese a esto, el comportamiento es el esperado y la diferencia entre resultados no excede el 5%.

4. CONCLUSIONES

Era de esperarse por supuesto, que se tuvieran ciertas desviaciones en los resultados ya que AZNHEX es un código de difusión y se está comparando contra Monte Carlo; sin embargo, los resultados que se proporcionan al usuario son confiables teniendo un grado de precisión adecuado. Analizando el caso del núcleo del reactor rápido refrigerado con sodio, se pudo observar una gran mejora en los resultados que tienen que ver con la distribución de potencia radial y axial; estos son más apegados a los que se obtienen con MCNP6 a diferencia de lo que se reporta en la referencia 4, donde los resultados para este caso tenían una incertidumbre considerable.

Las secciones eficaces obtenidas con SERPENT resultaron muy apropiadas para hacer que el código AZNHEX funcionará correctamente; prueba de ello son los resultados presentados en este trabajo. Con esto se demuestra que el código SERPENT es una buena opción para la generación de secciones eficaces.

En lo referente a las condiciones de reflexión que AZNHEX proporciona como opción al usuario, vemos que funciona de la manera esperada ya que en todos los casos analizados se utilizó y además, se obtuvieron resultados satisfactorios.

Esta versión de AZNHEX calcula también la distribución de flujo axial tanto por ensamble como en todo el núcleo, sin embargo, los resultados no fueron considerados en el presente trabajo ya que aún necesitan de una verificación más detallada puesto que ciertos valores presentan errores considerables. Por otra parte, simulaciones en estado transitorio también pueden analizarse por lo que se espera que a futuro puedan compararse y validarse casos con estas condiciones.

AGRADECIMIENTOS

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

REFERENCIAS

1. SERPENT, a Continuous-Energy Monte Carlo Reactor Physics Burnup Calculation Code <http://montecarlo.vtt.fi> (2016).
2. MCNP – A General Monte Carlo N-Particle Transport Code, Version 5. X-5 Monte Carlo Team. Los Alamos National Laboratory. (2003).
3. G. PALMIOTTI, “Nuclear Data Target Accuracies for Generation-IV Systems Based on the Use of New Covariance Data” *Journal of the Korean Physical Society*, **59**, p. 1264-1267 (2011).
4. Juan Galicia-Aragón, et. al., “Comparación y validación de los resultados del código AZNHEX v.1.0 con el código MCNP simulando el núcleo de un reactor rápido refrigerado con sodio”, XXVII Congreso Anual de la Sociedad Nuclear Mexicana, Villahermosa, Tabasco, 3 al 6 de Julio (2016).