

## **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**

**Juan Galicia-Aragón, Juan Luis François Lacouture, Guillermo Elías Bastida Ortiz**  
*Universidad Nacional Autónoma de México*  
Av. Universidad 3000, Circuito Exterior s/n, Ciudad Universitaria, 04510 México, D.F.  
*blink19871@hotmail.com, juan.louis.francois@gmail.com, gbo729@yahoo.com.mx*

**Jaime Esquivel-Estrada**  
*Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares*  
Carretera México-Toluca s/n, La Marquesa, C.P. 52750 Ocoyoacac, Méx., México  
*jaime.esquivel@inin.gob.mx*

### **Resumen**

El desarrollo de la plataforma AZTLAN para el análisis y diseño de reactores nucleares está liderado por el Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares y dividido en cuatro grupos de trabajo, los cuales tienen actividades bien definidas para lograr un avance significativo en este proyecto de manera individual y en conjunto. Dentro de estos grupos de trabajo se encuentra el grupo de usuarios, cuya tarea principal es usar los códigos que conforman la plataforma AZTLAN para proporcionar retroalimentación a los desarrolladores, y así lograr que las versiones finales de los códigos sean eficaces y a la vez confiables y de fácil comprensión. En este trabajo se presentan los resultados que proporciona el código AZNHEX v.1.0 al simular el núcleo de un reactor rápido refrigerado con sodio en estado estacionario. La validación de estos resultados es parte fundamental del desarrollo de la plataforma y responsabilidad del grupo de usuarios, por lo que, en esta investigación, los resultados obtenidos con AZNHEX se comparan y analizan con los proporcionados por el código de Monte Carlo MCNP5, software mundialmente utilizado y reconocido. Se presenta también una descripción de la metodología empleada con MCNP5 para el cálculo de las variables de interés y la diferencia que se tiene respecto a lo calculado con AZNHEX.

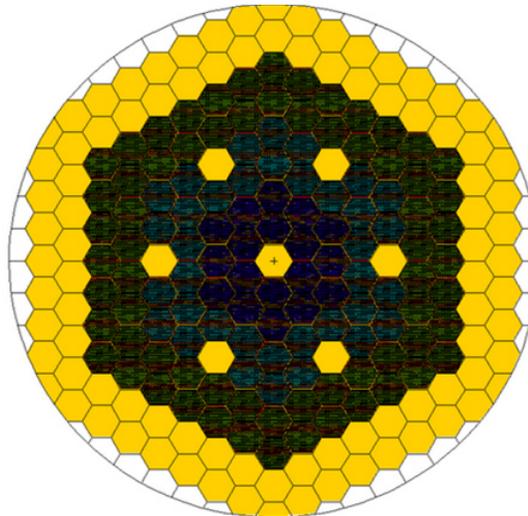
### **1. INTRODUCCIÓN**

El proyecto AZTLAN surgió como una iniciativa a nivel nacional para lograr posicionar a México a un nivel competitivo en temas de software para el análisis de reactores nucleares, en un esfuerzo por lograr la autonomía en este ámbito [1]. La plataforma AZTLAN está conformada por un código termo-hidráulico (AZTHECA) y tres códigos neutrónicos (AZTRAN, AZKIND y AZNHEX). El código AZNHEX es el resultado de un trabajo de implementación de un método de Elemento Finito (MEF) a la Galerkin, basado en la aproximación nodal polinomial RTN-0 para la solución de la ecuación de difusión de neutrones, multigrupos y dependiente del tiempo, para geometrías con corte transversal hexagonal-Z [2].

Al igual que los demás códigos, la primera versión de AZNHEX aún se encuentra en la etapa de mejoras y correcciones y por ello, se decidió probar la versión de este código comparando los resultados que proporciona (factor de multiplicación efectivo de neutrones, potencia radial y potencia axial por ensamble) con los que se obtienen simulando un mismo caso en particular con el código de Monte Carlo MCNP5, muy utilizado en el área nuclear. De esta manera, las versiones posteriores del código AZNHEX podrán ser más amigables para el usuario y los resultados finales de las variables de interés serán aún más precisos y confiables.

## 2. DESCRIPCIÓN DEL NÚCLEO SIMULADO

Para realizar la comparación entre los resultados que se obtienen con AZNHEX v.1.0 con los que se obtienen con MCNP5, se simuló el núcleo de un reactor rápido homogéneo refrigerado con sodio que cuenta con tres zonas de enriquecimiento diferente [3]. La primera zona (combustibles tipo 1) cuenta con 18 ensambles (9.5 % at U-235), la segunda zona (combustibles tipo 2) tiene 36 ensambles (14.25 % at U-235) y la tercera zona (cobertor) tiene 66 ensambles (3.32 % at U-235); todos ellos poseen encamisado de acero. El núcleo activo mide 99 cm y tiene reflectores de acero radiales (90 ensambles) y axiales. La Figura 1 muestra el núcleo de este reactor.



**Figura 1. Núcleo del reactor simulado con los códigos**

Las temperaturas de los materiales que conforman el núcleo del reactor se muestran en la Tabla I.

**Tabla I. Temperatura de los materiales del núcleo del reactor**

Material	Temperatura (K)
combustibles tipo 1	1200
combustibles tipo 2	1200
cobija	1200
encamisado	300
sodio	300

## 2.1. Consideraciones para la simulación en el código AZNHEX

Debido a las limitaciones con las que cuenta actualmente esta versión del código, se tuvieron que considerar tres importantes aspectos para poder simular apropiadamente el núcleo del reactor; estas consideraciones se muestran a continuación:

- Ya que el código AZNHEX por el momento no genera sus propias secciones eficaces, fue necesario simular este mismo núcleo con el código de Monte Carlo SERPENT v.2 [4] para obtener cada uno de los datos que son necesarios en el input de AZNHEX entre los que están el coeficiente de difusión, la sección eficaz de remoción y la matriz de dispersión.
- De las pruebas realizadas, los resultados más apropiados se lograron considerando únicamente 2 grupos de energía. Aunque esta versión responde favorablemente hasta con 6 grupos de energía, los resultados finales no fueron satisfactorios al considerar esta cantidad. Se espera que próximamente en futuras versiones del código se puedan considerar al menos 7 grupos de energía arrojando resultados más precisos para la simulación de un reactor rápido.
- El pitch entre cada ensamble es de 17.54 cm, sin embargo, ya que AZNHEX no considera el encamisado al efectuar los cálculos, fue necesario ajustar este valor para no afectar los resultados finales. De este modo, el pitch en las simulaciones con AZNHEX fue de 16.54 cm.

## 3. CÁLCULOS DE CRITICIDAD

La estimación del factor de multiplicación efectivo de neutrones ( $k_{eff}$ ) fue lo inicialmente considerado para realizar el análisis. La simulación en los códigos se efectuó en estado estacionario y sin quemado. La Tabla II presenta los valores obtenidos de la  $k_{eff}$  en AZNHEX, MCNP5 y SERPENT2 junto con el tiempo aproximado de ejecución y la diferencia de reactividad respecto a los códigos de Monte Carlo.

**Tabla II. Resultados obtenidos de la  $k_{eff}$**

Código	$k_{eff}$	Dif. con respecto a MCNP5 (pcm)	Dif. con respecto a SERPENT2 (pcm)	Tiempo aprox. de ejecución (min.)
* MCNP5 (20000 hist., 200 cycles)	1.03736 +- 0.00040	---	---	155
** SERPENT2 (20000 hist., 200 cycles)	1.03824 +- 0.00040	---	---	5
* AZNHEX v.1.0	1.03812	-73.263	11.558	12

De la Tabla II se aprecia que la diferencia más alta se tiene con respecto a MCNP5 con aproximadamente 73 pcm; pese a esto, la aproximación es sumamente aceptable. En cambio, la diferencia con respecto a SERPENT2 es de sólo 11 pcm. La diferencia de resultados entre los códigos de Monte Carlo radica, principalmente, en las librerías de secciones eficaces utilizadas

\* MCNP5 y AZNHEX se corrieron en una computadora Alienware AURORA\_R3 con procesador Intel® Core™ i7-2600 CPU @ 3.40GHz y memoria RAM de 6 GB. \*\* SERPENT2 se corrió en una computadora DELL con procesador Intel® Core™ i7-4770 CPU @ 3.40GHz x 8 y memoria RAM de 6 GB.

(ENDF/B.VII.2 en MCNP5 y JEFF 3.2 en SERPENT2) aunque se puede ver que la estimación de la  $k_{\text{eff}}$  no difiere mucho entre ambos. Con respecto al tiempo de ejecución, vemos que a MCNP5 le llevó más tiempo realizar en su totalidad los cálculos; en el caso de SERPENT2, la simulación se efectuó con procesamiento en paralelo con 4 núcleos, logrando efectuar los mismos cálculos en solo 5 minutos. En el caso de AZNHEX, ya que aún no cuenta con la opción de realizar los cálculos en paralelo, el tiempo de la ejecución fue de 12 minutos, mucho menor al de MCNP5.

El código AZNHEX también cuenta con la opción de poner condiciones de reflexión en las fronteras que lo requieran [2]; aprovechando esta característica, se realizó una comparación entre los valores del factor de multiplicación de neutrones y el tiempo de ejecución al simular un cuarto del núcleo y la mitad del núcleo con lo obtenido al simular el núcleo completo. La Tabla III muestra los resultados obtenidos.

**Tabla III. Valores obtenidos del factor de multiplicación de neutrones con AZNHEX v.1.0**

Simulación	Factor de multiplicación de neutrones	Dif. (pcm)	Número de iteraciones	Tiempo aprox. de ejecución (min.)
1/4 núcleo	1.03771	39.494	8	4
1/2 núcleo	1.03849	-35.641	8	9
Núcleo completo	1.03812	---	8	12

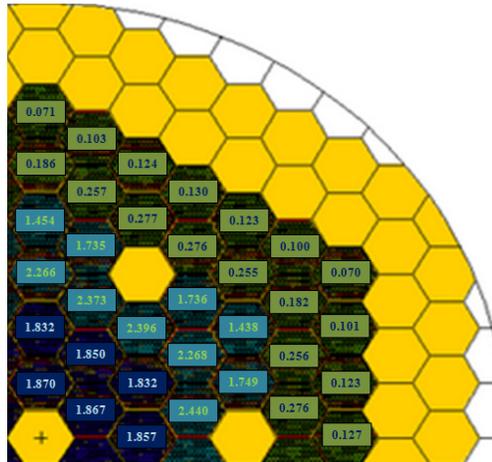
Observando los resultados de la Tabla III, vemos que la diferencia de reactividad con respecto al valor obtenido simulando el núcleo completo es realmente muy poca, lo que hace que el usuario pueda realizar un modelo de un núcleo de un reactor con geometría hexagonal utilizando las condiciones de reflexión, siempre y cuando el núcleo cuente con simetría. Este se comprueba también observando el número de iteraciones que el código efectúa para que el resultado finalmente converja (8 iteraciones en todos los casos) y el tiempo de ejecución que como era de esperarse, es menor para el caso de un cuarto de núcleo.

#### 4. COMPARACIÓN DE LA POTENCIA RADIAL

La potencia radial en MCNP5 se calcula empleando *tallies* del tipo F7, los cuales estiman la energía de fisión promedio depositada en una celda [5]. De esta manera, en cada uno de los ensamblajes del núcleo se colocan estos *tallies* para obtener el resultado deseado. Ya que el núcleo es simétrico, los *tallies* F7 sólo fueron colocados en los ensamblajes que abarcaran un cuarto del núcleo. La Tabla IV muestra los valores obtenidos para la potencia radial con MCNP5. Estos datos están normalizados a una potencia promedio igual a uno para realizar una mejor comparación con los resultados de AZNHEX. Posteriormente, en la Figura 2 se muestra la vista del cuarto del núcleo con los valores finales obtenidos de la potencia relativa en cada ensamblaje.

**Tabla IV. Potencia normalizada por ensamblaje calculada con MCNP5**

0.127	0.123	0.276	0.101	0.256	1.749	2.440
1.857	0.070	0.182	1.438	2.268	1.832	1.867
0.100	0.255	1.736	2.396	1.850	1.870	0.123
0.276	...	2.373	1.832	0.130	0.277	1.735
2.266	0.124	0.257	1.454	0.103	0.186	0.071



**Figura 2. Distribución de potencia radial (MCNP5)**

De la Tabla IV y Figura 2, se observa que los valores más altos de la potencia se localizan en la zona de los combustibles tipo 2, siendo el valor máximo igual a 2.396. Por el contrario, los valores más pequeños se encuentran en la zona del cobertor siendo los valores mínimos 0.071 y 0.070. Al igual que estos últimos resultados, se aprecia como varios valores de potencia resultan ser muy parecidos a otros, esto debido a la simetría con la que cuenta este núcleo. Cabe resaltar que en la Tabla IV se tiene una celda sin valor numérico, esto se debe a que se colocó un *tally* del tipo F7 en un ensamble de acero únicamente para verificar que los resultados finales correspondían a cada ensamble seleccionado. El código AZNHEX proporciona directamente la potencia radial en su archivo de salida. Al igual que con MCNP5 sólo se seleccionaron los resultados de los ensambles que abarcaran un cuarto del núcleo. La Tabla V presenta los valores que evaluó AZNHEX una vez finalizada la simulación.

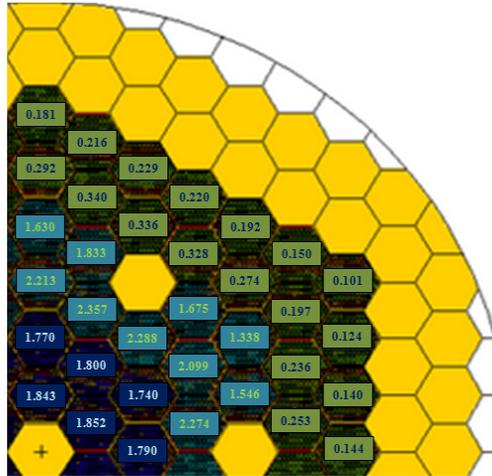
**Tabla V. Potencia por ensamble obtenida con AZNHEX**

0.149	0.144	0.261	0.128	0.244	1.595	2.347
1.847	0.104	0.203	1.381	2.166	1.796	1.911
0.155	0.283	1.728	2.361	1.857	1.902	0.198
0.338	...	2.432	1.826	0.227	0.347	1.891
2.284	0.236	0.351	1.682	0.223	0.301	0.187

Los valores presentados en la Tabla V no están normalizados a una potencia promedio de uno, al efecto se procedió a realizar esta tarea para poder comparar apropiadamente los resultados de AZNHEX con los de MCNP5. La Tabla VI muestra los valores de las potencias por ensamble ya normalizados y en la Figura 3 se presenta una vista del cuarto del núcleo con los valores de la potencia relativa por ensamble.

**Tabla VI. Potencia normalizada por ensamble (AZNHEX)**

0.144	0.140	0.253	0.124	0.236	1.546	2.274
1.790	0.101	0.197	1.338	2.099	1.740	1.852
0.150	0.274	1.675	2.288	1.800	1.843	0.192
0.328	...	2.357	1.770	0.220	0.336	1.833
2.213	0.229	0.340	1.630	0.216	0.292	0.181



**Figura 3. Distribución de la potencia radial (AZNHEX)**

Los resultados más altos de la potencia también se encuentran en la zona de los combustibles tipo 2 y el valor máximo resultó ser igual a 2.357. Sin embargo, se puede apreciar que algunos valores difieren notablemente de los obtenidos con MCNP5 para un mismo ensamble, sobre todo en la zona del cobertor. Para un mejor análisis, se calcularon los errores relativos de los valores de AZNHEX respecto a los obtenidos con MCNP, éstos resultados se muestran en la Tabla VII.

**Tabla VII. Errores relativos respecto a MCNP (%)**

-13.454	-13.436	8.382	-22.684	7.666	11.638	6.788
3.605	-43.501	-8.307	6.903	7.444	5.000	0.826
-50.131	-7.470	3.564	4.518	2.733	1.419	-56.152
-18.853	...	0.674	3.389	-69.272	-21.267	-5.605
2.320	-84.303	-32.273	-12.089	-110.669	-57.210	-155.047

Las celdas sombreadas representan los errores relativos menores al 10% y si observamos las Figuras 2 y 3, es posible notar que los valores más acertados de la potencia con respecto a MCNP5 están en las zonas de los combustibles tipo 1 y 2. Por el contrario, las diferencias más notables se encuentran en la zona del cobertor, especialmente en los ensambles que se localizan cerca de los reflectores de acero. Se puede ver que los resultados de AZNHEX v.1.0 no reflejan una buena simetría, lo que causa que existan errores relativos muy altos en algunos ensambles.

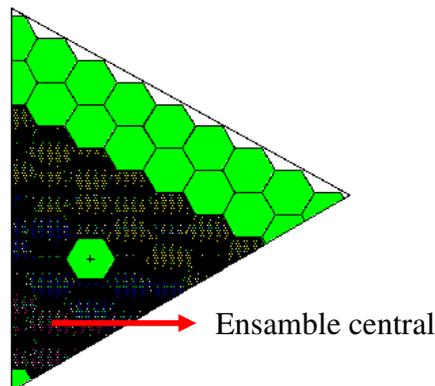
## 5. COMPARACIÓN DE LA POTENCIA AXIAL

MCNP5 tiene la opción de definir una malla superpuesta sobre la geometría del problema calculando por default el flujo neutrónico promedio en cada punto de la malla [5]; esto se logra empleando la tarjeta FMESH. Para obtener la distribución de potencia, es necesario utilizar también una tarjeta multiplicadora (FMn card) en conjunto con la tarjeta FMESH [6].

Para calcular la potencia axial por ensamble, se tuvo que simular nuevamente parte del núcleo empleando una metodología diferente. Ya que este núcleo es simétrico, sólo fue necesario simular una sexta parte colocando condiciones de reflexión en las fronteras que lo requirieran. Como la tarjeta FMESH no realiza mallado hexagonal, se optó por usar un mallado cilíndrico tratando de abarcar la mayor cantidad de material fisible posible en cada uno de los ensambles.

El factor de multiplicación obtenido al simular un sexto del núcleo fue de  $1.04020 \pm 0.00040$ . Comparando este resultado con el presentado en la Tabla II ( $k_{\text{eff}} = 1.03736$ ) se aprecia que hay un exceso de reactividad de aproximadamente 274 pcm de diferencia; sin embargo, los resultados calculados que se muestran más adelante son bastante aceptables y el comportamiento de la potencia axial es el esperado. En las Tablas pares de la VIII a la XXI se presentan los resultados finales obtenidos con AZNHEX y con MCNP5 para la potencia axial, así como los errores relativos con respecto al código de Monte Carlo. Al igual que lo realizado para la potencia radial, los resultados de la potencia axial por ensamble fueron normalizados a uno y estos se muestran en las Tablas nones. El comportamiento de la potencia se va mostrando en las Figuras indicadas debajo de cada Tabla. Para una mejor comprensión, se señala antes de cada Tabla el ensamble donde se colocó la malla.

- Ensamblados con combustible tipo 1



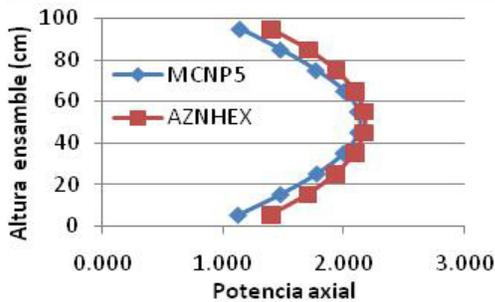
**Figura 4. Vista donde se muestra el ensamble donde se colocó la malla**

**Tabla VIII. Potencia axial**

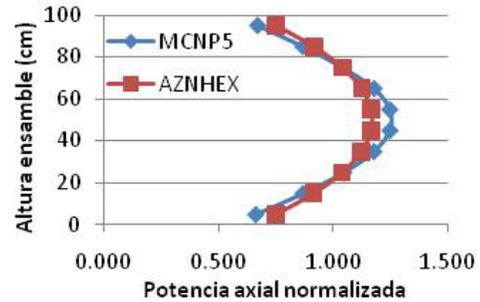
MCNP5	AZNHEX	Error relativo (%)
1.143	1.395	-22.047
1.479	1.703	-15.145
1.773	1.935	-9.137
2.007	2.091	-4.185
2.124	2.169	-2.119
2.125	2.168	-2.024
2.005	2.089	-4.190
1.781	1.932	-8.478
1.480	1.699	-14.797
1.129	1.391	-23.206

**Tabla IX. Potencia axial normalizada**

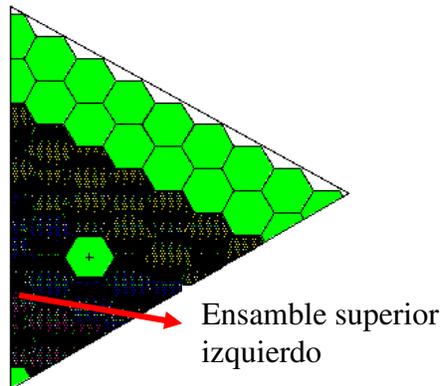
MCNP5	AZNHEX	Error relativo (%)
0.671	0.751	-12.019
0.868	0.917	-5.684
1.04	1.042	-0.170
1.177	1.126	4.375
1.246	1.168	6.272
1.247	1.167	6.359
1.176	1.125	4.371
1.045	1.040	0.435
0.868	0.915	-5.365
0.662	0.749	-13.083



**Figura 5. Comportamiento de la potencia axial**



**Figura 6. Comportamiento de la potencia axial normalizada**



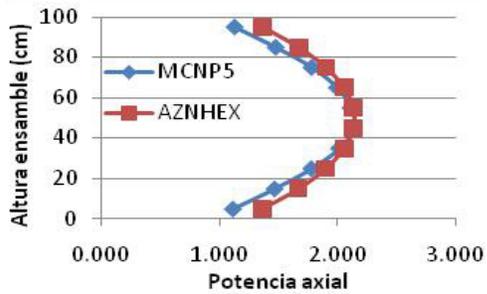
**Figura 7. Vista donde se muestra el ensamble donde se colocó la malla**

**Tabla X. Potencia axial**

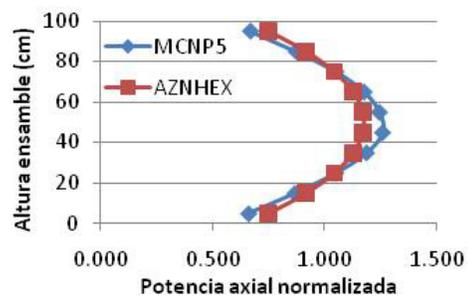
MCNP5	AZNHEX	Error relativo (%)
1.135	1.371	-20.793
1.482	1.674	-12.955
1.786	1.902	-6.495
2.000	2.055	-2.750
2.116	2.132	-0.756
2.141	2.131	0.467
2.018	2.054	-1.784
1.784	1.900	-6.502
1.473	1.671	-13.442
1.121	1.367	-21.945

**Tabla XI. Potencia axial normalizada**

MCNP5	AZNHEX	Error relativo (%)
0.665	0.751	-12.847
0.869	0.917	-5.525
1.047	1.042	0.511
1.173	1.126	4.009
1.241	1.168	5.872
1.255	1.167	7.015
1.183	1.125	4.912
1.046	1.041	0.504
0.864	0.915	-5.979
0.657	0.749	-13.923

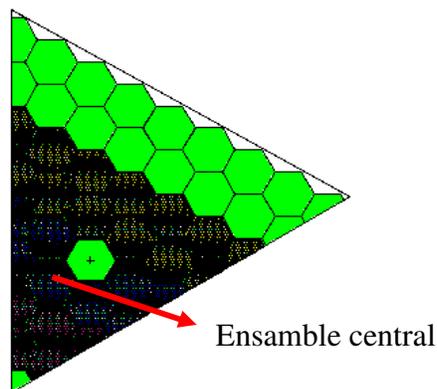


**Figura 8. Comportamiento de la potencia axial**



**Figura 9. Comportamiento de la potencia axial normalizada**

- Ensamblajes con combustible tipo 2



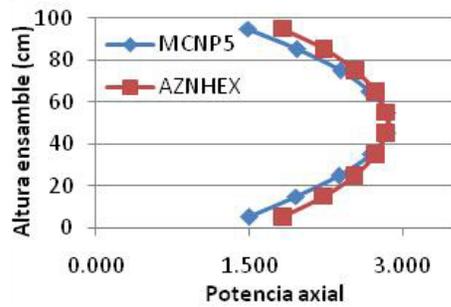
**Figura 10. Vista donde se muestra el ensamble donde se colocó la malla**

**Tabla XII. Potencia axial**

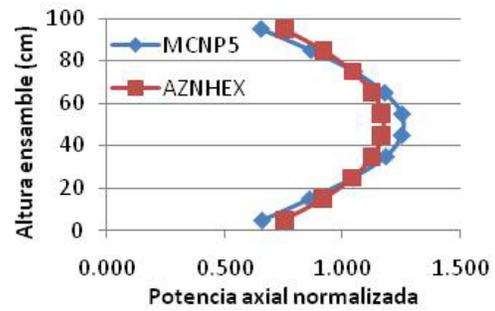
MCNP5	AZNHEX	Error relativo (%)
1.491	1.831	-22.803
1.971	2.233	-13.293
2.385	2.534	-6.247
2.679	2.736	-2.128
2.845	2.837	0.281
2.843	2.836	0.246
2.69	2.733	-1.599
2.372	2.53	-6.661
1.956	2.228	-13.906
1.501	1.825	-21.586

**Tabla XIII. Potencia axial normalizada**

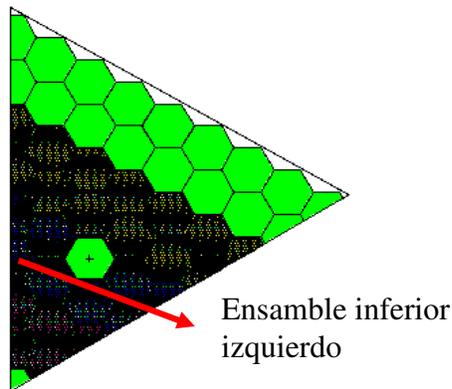
MCNP5	AZNHEX	Error relativo (%)
0.656	0.753	-14.776
0.867	0.918	-5.887
1.049	1.042	0.698
1.178	1.125	4.548
1.251	1.166	6.800
1.251	1.166	6.767
1.183	1.124	5.043
1.043	1.040	0.311
0.860	0.916	-6.460
0.660	0.750	-13.638



**Figura 11. Comportamiento de la potencia axial**



**Figura 12. Comportamiento de la potencia axial normalizada**



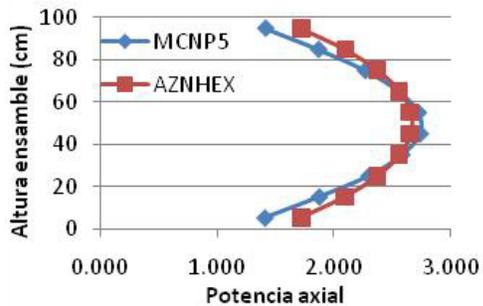
**Figura 13. Vista donde se muestra el ensamble donde se colocó la malla**

**Tabla XIV. Potencia axial**

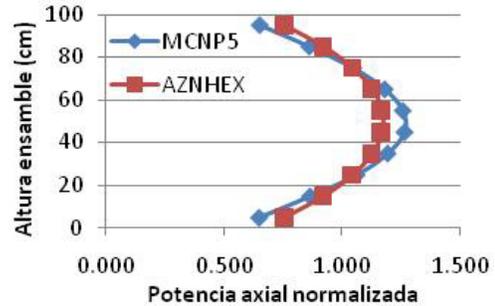
MCNP5	AZNHEX	Error relativo (%)
1.413	1.722	-21.868
1.867	2.099	-12.426
2.267	2.379	-4.940
2.557	2.567	-0.391
2.721	2.661	2.205
2.738	2.660	2.849
2.582	2.565	0.658
2.299	2.376	-3.349
1.873	2.094	-11.799
1.407	1.717	-22.033

**Tabla XV. Potencia axial normalizada**

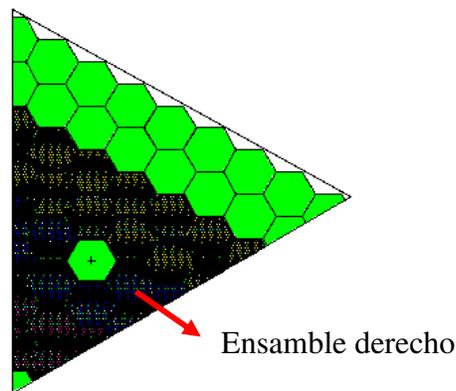
MCNP5	AZNHEX	Error relativo (%)
0.650	0.754	-15.914
0.859	0.919	-6.933
1.044	1.042	0.187
1.177	1.124	4.514
1.253	1.165	6.983
1.260	1.165	7.596
1.189	1.123	5.512
1.058	1.040	1.701
0.862	0.917	-6.337
0.648	0.752	-16.070



**Figura 14. Comportamiento de la potencia axial**



**Figura 15. Comportamiento de la potencia axial normalizada**



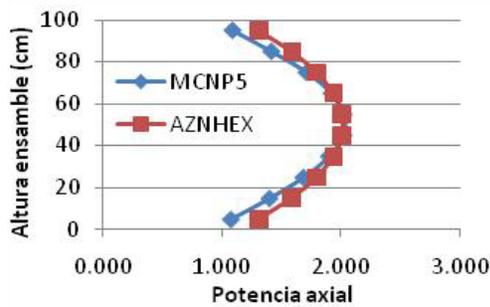
**Figura 16. Vista donde se muestra el ensamble donde se colocó la malla**

**Tabla XVI. Potencia axial**

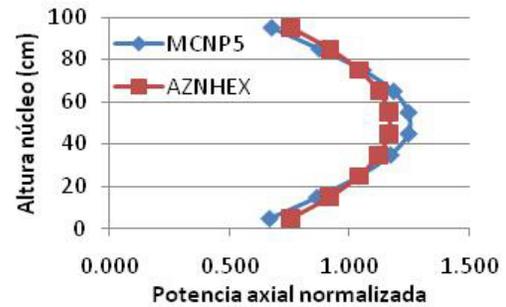
MCNP5	AZNHEX	Error relativo (%)
1.092	1.310	-19.963
1.416	1.588	-12.147
1.711	1.798	-5.085
1.920	1.939	-0.990
2.020	2.011	0.446
2.021	2.010	0.544
1.899	1.938	-2.054
1.685	1.795	-6.528
1.401	1.584	-13.062
1.078	1.305	-21.058

**Tabla XVII. Potencia axial normalizada**

MCNP5	AZNHEX	Error relativo (%)
0.672	0.758	-12.777
0.872	0.919	-5.429
1.053	1.041	1.210
1.182	1.122	5.060
1.244	1.164	6.409
1.244	1.163	6.502
1.169	1.122	4.060
1.037	1.039	-0.147
0.863	0.917	-6.289
0.664	0.755	-13.806

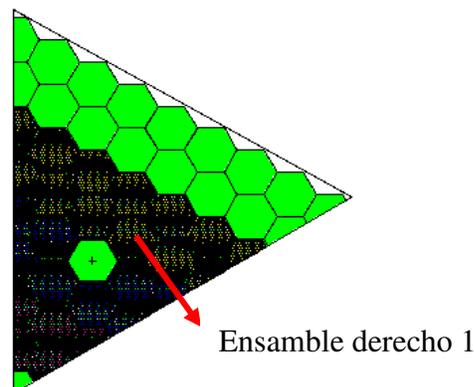


**Figura 17. Comportamiento de la potencia axial**



**Figura 18. Comportamiento de la potencia axial normalizada**

- Ensamblajes en la zona del cobertor



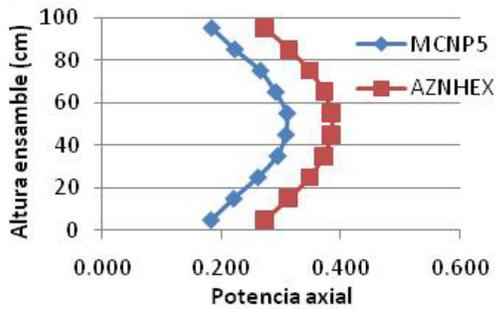
**Figura 19. Vista donde se muestra el ensamble donde se colocó la malla**

**Tabla XVIII. Potencia axial**

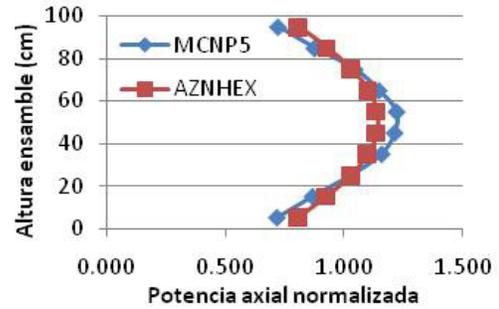
MCNP5	AZNHEX	Error relativo (%)
0.183	0.273	-49.180
0.222	0.314	-41.441
0.265	0.348	-31.321
0.291	0.373	-28.179
0.310	0.385	-24.194
0.308	0.385	-25.000
0.294	0.372	-26.531
0.261	0.348	-33.333
0.220	0.313	-42.273
0.182	0.272	-49.451

**Tabla XIX. Potencia axial normalizada**

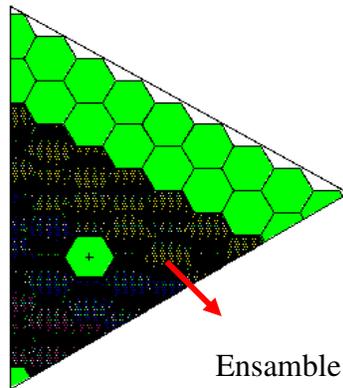
MCNP5	AZNHEX	Error relativo (%)
0.722	0.807	-11.830
0.875	0.928	-6.029
1.045	1.029	1.558
1.147	1.103	3.913
1.222	1.138	6.901
1.215	1.138	6.296
1.159	1.100	5.149
1.029	1.029	0.049
0.868	0.925	-6.652
0.718	0.804	-12.033



**Figura 20. Comportamiento de la potencia axial**



**Figura 21. Comportamiento de la potencia axial normalizada**



Ensamble derecho 2

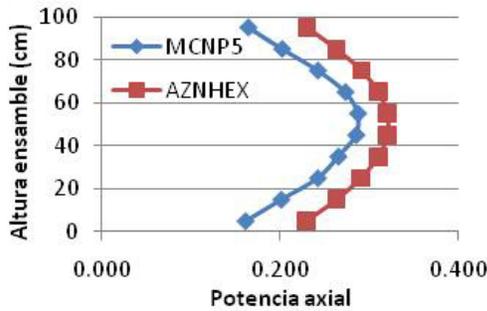
**Figura 22. Vista donde se muestra el ensamble donde se colocó la malla**

**Tabla XX. Potencia axial**

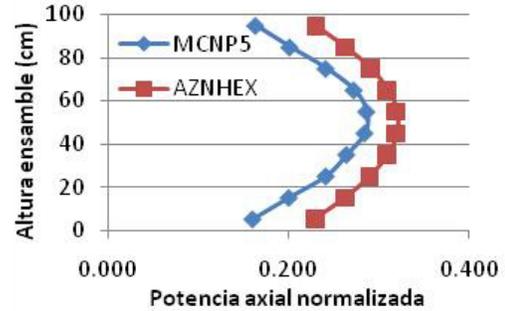
MCNP5	AZNHEX	Error relativo (%)
0.164	0.230	-40.244
0.202	0.263	-30.198
0.242	0.291	-20.248
0.273	0.310	-13.553
0.287	0.320	-11.498
0.285	0.320	-12.281
0.265	0.310	-16.981
0.242	0.290	-19.835
0.201	0.263	-30.846
0.161	0.229	-42.236

**Tabla XXI. Potencia axial normalizada**

MCNP5	AZNHEX	Error relativo (%)
0.706	0.814	-15.232
0.870	0.931	-6.978
1.042	1.030	1.198
1.176	1.097	6.698
1.236	1.132	8.387
1.227	1.132	7.744
1.141	1.097	3.882
1.042	1.026	1.537
0.866	0.931	-7.510
0.693	0.810	-16.869



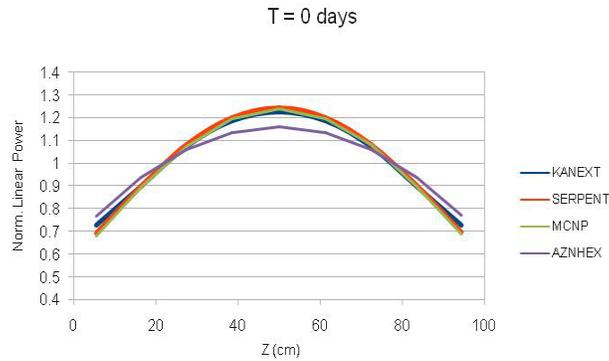
**Figura 23. Comportamiento de la potencia axial**



**Figura 24. Comportamiento de la potencia axial normalizada**

Analizando los resultados obtenidos con el código AZNHEX v.1.0, se observa que los ensambles que cuentan con los combustibles tipo 1 y 2 presentan una mejor aproximación a los valores calculados con MCNP5. Los errores relativos de la potencia axial son muy pequeños en la parte media de los ensambles, en cambio, el error se incrementa significativamente en los extremos; es posible que las secciones eficaces del reflector de acero influyan en estos resultados. Esto puede corroborarse al apreciar los valores de los ensambles obtenidos con AZNHEX en la zona del cobertor, los cuales cuentan con errores relativos muy altos aunque el comportamiento resulte apropiado. Estos últimos resultados confirman lo obtenido en la potencia radial, donde los ensambles en la zona del cobertor presentan una diferencia notable en los valores de la potencia, comparándolos con lo calculado con MCNP5. También hay que considerar que en las fronteras núcleo-reflector, tanto axial como radial, se presentan variaciones del flujo importantes, las cuales no son tratadas adecuadamente por la aproximación de difusión.

Un análisis extra se realizó al calcular también la potencia axial promedio en todo el núcleo con AZNHEX v.1.0. Para verificar y validar los resultados obtenidos, este cálculo se efectuó también con los códigos KANEXT [7], SERPENT2 y MCNP5; con este último código, nuevamente se empleó la tarjeta FMESH y la tarjeta multiplicadora (FMn card). La Figura 25 muestra la potencia axial promedio obtenida en el núcleo.



**Figura 25. Potencia axial promedio en el núcleo**

El comportamiento obtenido con KANEXT, SERPENT2 y MCNP5 mostrado en la Figura 25 es prácticamente el mismo. Como era de esperarse, el máximo se obtiene en la parte media del núcleo (altura de 50 cm) con un valor de 1.24. Por otra parte, el código AZNHEX presenta un valor máximo de 1.16 también localizado en la parte media. Se aprecia que la distribución de la potencia obtenida con AZNHEX v.1.0 presenta una aproximación aceptable comparada con la de los otros tres códigos, sin embargo, estos resultados pueden hacerse aun más precisos en las versiones posteriores.

## 6. CONCLUSIONES

Esta versión del código AZNHEX, pese a ser limitada, presenta un resultado muy preciso de la  $k_{\text{eff}}$  tras un proceso de iteración realmente corto. Se pudo comprobar que este código es muy eficaz cuando se tienen presentes condiciones de reflexión ya que el factor de multiplicación de neutrones obtenido en cada caso, difiere muy poco uno de otro; esto hace que el usuario pueda definir un núcleo con estas condiciones si se requiere un ahorro en el tiempo de cómputo. Respecto al cálculo de la potencia radial y axial, aún se tienen aspectos que necesitan verificarse y mejorarse ya que los valores que se tienen en algunos ensambles difieren en gran manera de los calculados con MCNP5, aunque otros presentan aproximaciones muy exactas. Es necesario que las versiones posteriores del código ya no cuenten con las limitaciones de esta primera versión, principalmente en el número de grupos de energía (para simular un reactor rápido) para poder efectuar una comparación más realista en estado estacionario y en estado transitorio.

## AGRADECIMIENTOS

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

Al Dr. Roberto Carlos López Solís, por ser el creador del RCFR (analizado en este estudio) y por aportar la distribución de potencia promedio axial del núcleo obtenida con KANEXT.

## REFERENCIAS

1. Armando M. Gómez Torres, et. al., “AZTLAN Platform: Plataforma Mexicana para el Análisis y Diseño de Reactores Nucleares”, *XXV Congreso Anual de la Sociedad Nuclear Mexicana*, Boca del Río, Veracruz, 31 de Agosto a 4 de Septiembre (2014).
2. Jaime Esquivel Estrada, Roberto Carlos López Solís – *AZNHEX v.1.0 AZTLAN Neutronic Hexagonal Code Manual de Usuario*, México (2015)
3. Roberto López-Solis, Juan Luis François-Lacouture, “Long-Life Breed/Burn Reactor Design through Reshuffle Scheme”, *Int. J. Nuclear Energy Science and Technology*, **9**, p. 263-277 (2015).
4. SERPENT, a Continuous-Energy Monte Carlo Reactor Physics Burnup Calculation Code, <http://montecarlo.vtt.fi> (2016).
5. MCNP – A General Monte Carlo N-Particle Transport Code, Version 5. X-5 Monte Carlo Team. Los Alamos National Laboratory. (2003).
6. Derk Van Veen, J. Eduard Hoogenboom, “Efficiency Improvement of Local Power Estimation in the General Purpose Monte Carlo Code MCNP”, *Progress in Nuclear Science and Technology*, **2**, p. 866-871 (2011).
7. Becker, M. et. al., “KANEXT, a tool for nuclear reactor calculations: Description of the export version” Karlsruhe Institute of Technology, Institute for Neutron Physics and Reactor Technology. Karlsruhe, Germany. (2011).