



MX0500417

*Energía Nuclear y Seguridad Radiológica: Nuevos Retos y Perspectivas*  
*XIV Congreso Anual de la SNM/XXI Reunión Anual de la SMSR*  
Guadalajara, Jalisco, México, 10-13 de Septiembre, (2003), Memorias en CDROM

---

## ***Diseño de un Núcleo de Equilibrio de un Reactor Tipo BWR Basado en un Combustible de Torio-Uranio***

---

**Juan Luis Francois y Alejandro Núñez-Carrera**

*Laboratorio de Análisis en Ingeniería de Reactores Nucleares.*

*Facultad de Ingeniería – UNAM. Paseo Cuauhnáhuac 8532, Jiutepec, Mor.*

*jflf@fi-b.unam.mx; alexnunezc@yahoo.com.mx*

### **Resumen**

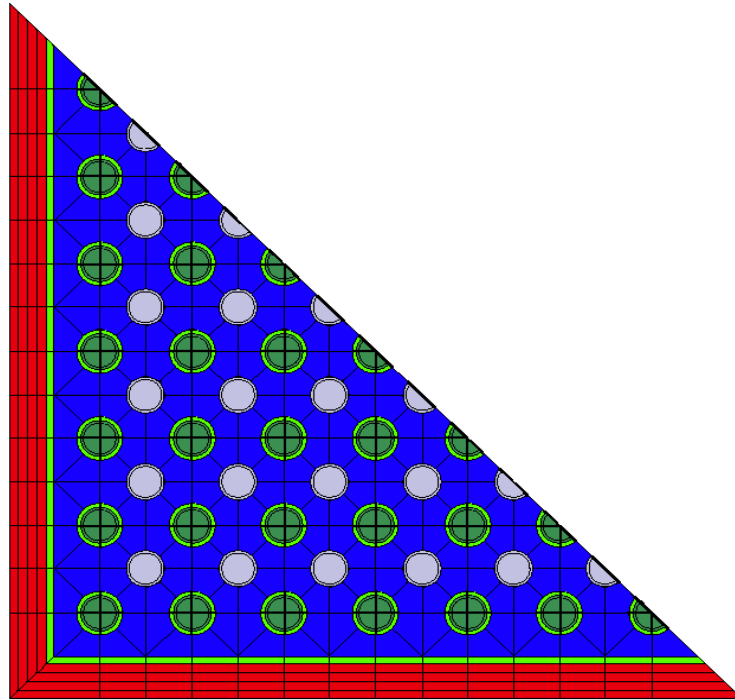
En este trabajo se presenta el diseño del núcleo de un reactor de agua hirviente usando combustible de torio-uranio. A partir de un concepto integral basado en un ensamble tipo cobija-semilla se realiza el diseño de una recarga de equilibrio para el núcleo de un reactor como el de la Central Laguna Verde y se analizan algunas de las principales variables de diseño como la longitud del ciclo, la fracción de recarga, el quemado del combustible, la distribución de vacíos, la generación de calor lineal, el margen de apagado, así como una primera estimación del costo del combustible. Los resultados muestran que es factible obtener una recarga de equilibrio, comparable a las que se realizan en los reactores de la Central Laguna Verde, con un buen comportamiento de las variables analizadas. El costo de la recarga de equilibrio diseñada con el combustible de torio-uranio es aproximadamente 2% más alto que el de una recarga de uranio produciendo la misma energía. Se concluye que es conveniente incluir venenos quemables, tipo gadolinia, en el combustible con el fin de mejorar el diseño de la recarga, los costos del combustible y el margen de apagado.

### **1. INTRODUCCIÓN**

El uso del torio en los reactores de agua ligera y de agua pesada ha tomado gran interés debido a las ventajas potenciales que pueden ser obtenidas del ciclo del torio [1,2,3]. En este trabajo se presenta el diseño del núcleo de un reactor de agua hirviente (BWR) usando torio como combustible nuclear en un concepto integrado cobija-semilla. Este concepto viene del hecho de que la cobija y las barras de semilla están localizadas en el mismo ensamble y son quemadas a través del ciclo de operación.

En un trabajo previo [4] se presentó el diseño neutrónico de un combustible innovador para un BWR. La base del diseño de la celda combustible es usar la capacidad de conversión del torio en el espectro de un BWR, tomando la ventaja de la cría del U-233. Otras de las metas buscadas en ese diseño fueron las de reducir la producción de actínidos de larga vida y mejorar la economía del ciclo buscando reducir el enriquecimiento del U-235, con respecto a otros diseños de uranio y torio que utilizan enriquecimientos entre 10% y 20% de U-235 [5,6]. El concepto de cobija-semilla fue usado en el diseño del combustible, y se diseñó una celda de paso triangular

incluyendo una sub-celda de cobija (barras de ThO<sub>2</sub>) y una sub-celda de semilla (barras de U-Zr) en un arreglo heterogéneo, integrado en un ensamble estándar de un BWR como se muestra en la Figura 1. Se diseñó también un ensamble llamado *cobija-dummy*, en el cual la barra ficticia (*dummy*) de circonio ocupa el centro de la celda triangular en lugar de la barra de semilla. Con estos ensambles cobija-semilla y cobija-dummy, se diseñó un núcleo para obtener un ciclo de equilibrio en un BWR estándar como el de la Central Laguna Verde (CLV).



**Figura 1. Ensamble Cobija-Semilla (simetría diagonal). Sub-ensamble de cobija (barras en color verde), sub-ensamble de semilla (barras en color gris)**

## 2. METODOLOGÍA DEL DISEÑO DEL NÚCLEO

El núcleo de la Central Laguna Verde fue escogido como base para el diseño del núcleo de equilibrio típico de un BWR. Este es un núcleo pequeño con 444 ensambles combustibles operando a una potencia de 2027 MWt, por tanto el reto es colocar los ensambles de cobija-semilla y cobija-dummy de tal forma que se obtenga una buena cría de U-233 mientras se tiene una distribución razonable de potencia para obtener una longitud deseada de ciclo. Los cálculos fueron hechos con el código CM-PRESTO [7] que es un simulador neutrónico-termohidráulico estático en tres dimensiones. Los bancos de datos nucleares fueron generados con el sistema HELIOS [8] y fueron

procesados con TABGEN [9] para obtener las tablas de secciones eficaces como función del quemado, vacíos, exposición pesada por vacíos (vacíos históricos) las cuales son usadas por CM-PRESTO. La estrategia Haling fue utilizada para obtener una longitud de ciclo de un año de operación a plena potencia (EFPD) con un eigenvalor blanco (*target*) al final del ciclo. Se simularon un número suficiente de ciclos hasta que no se observó ningún cambio en la longitud del ciclo, potencia, quemado, y distribución de vacíos en el núcleo.

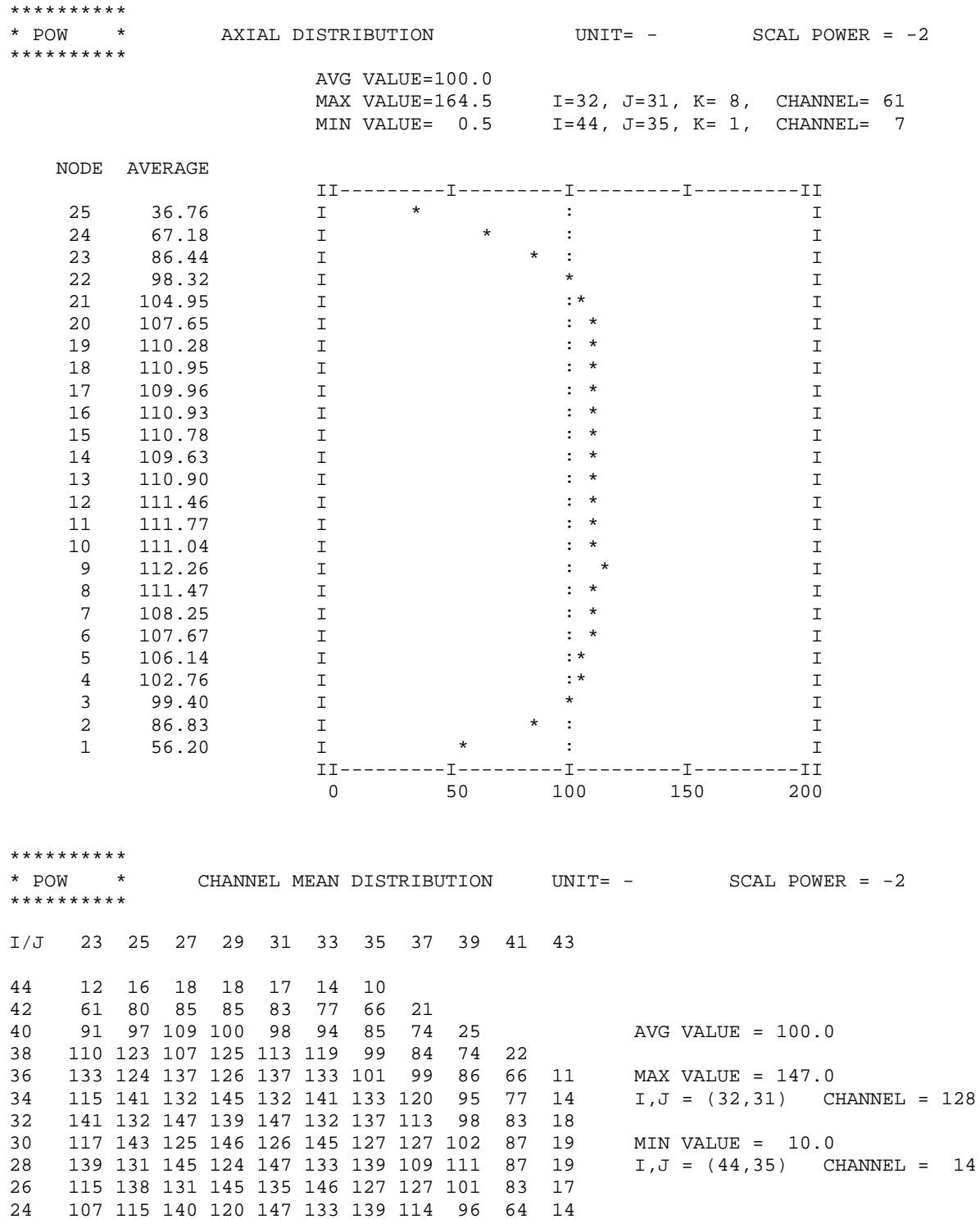
La estrategia general de carga es la siguiente: los ensambles frescos de cobija-dummy son primeramente cargados hacia la periferia en el núcleo durante su primer ciclo para producir su propio material físil (principalmente U-233). En el siguiente ciclo el sub-ensamble de cobija será ensamblado con el sub-ensamble de semilla fresca para formar el ensamble de cobija-semilla (el sub-ensamble de zirconio es retirado en este momento) y reubicado en el núcleo. La ventaja de tener barras de cobija-semilla en el mismo ensamble combustible es que reduce la marcada diferencia de potencia entre la cobija y la semilla que se observan en otros diseños [5,6] en los cuales estas dos regiones se encuentran separadas.

### 3. RESULTADOS

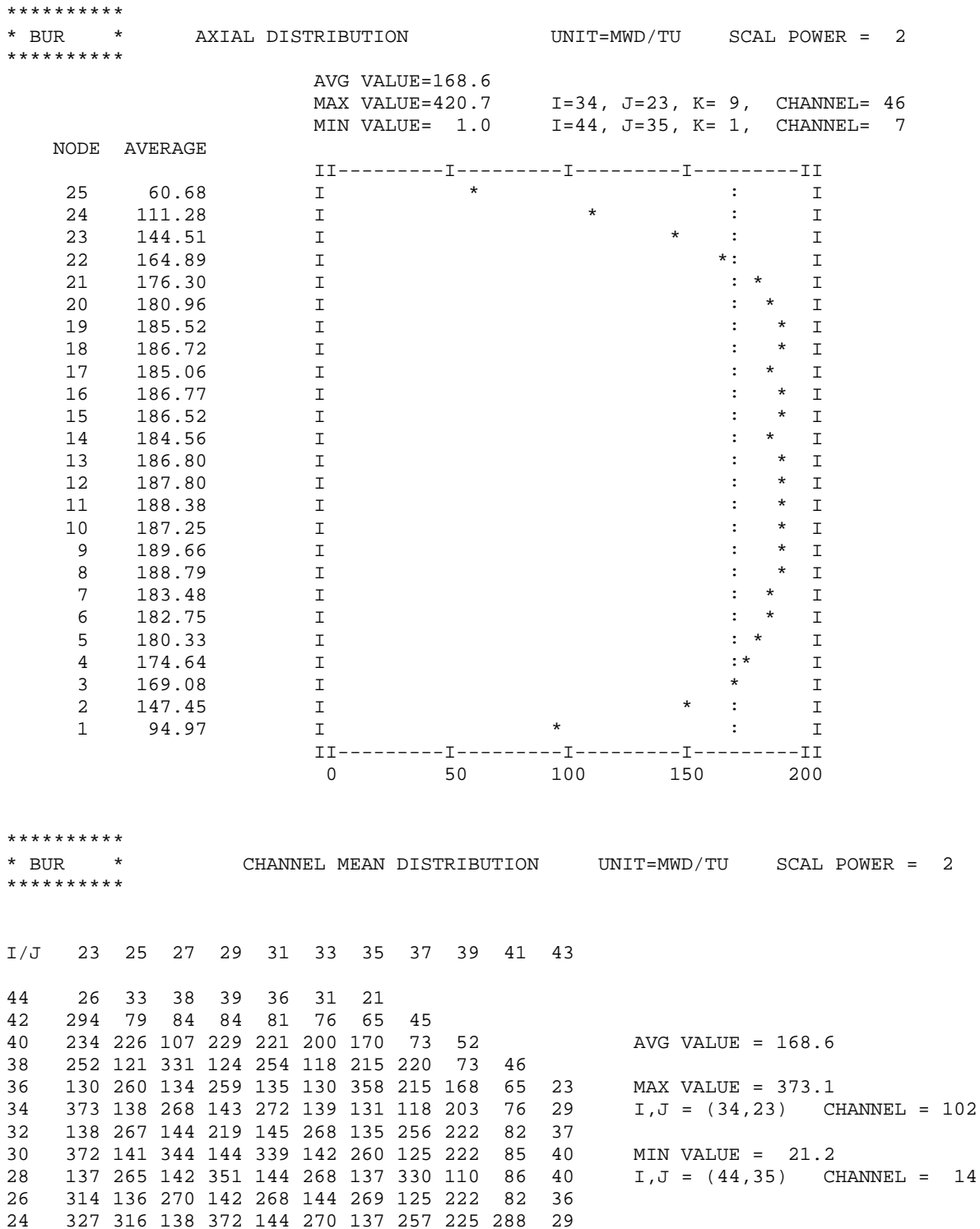
Se diseñó una recarga de 104 ensambles combustibles con un enriquecimiento promedio en U-235 del 7.5w/o en el sub-ensamble de semilla, para obtener una longitud de ciclo de 365 días a plena potencia; el sub-ensamble de cobija fresca contiene sólo barras de ThO<sub>2</sub>. La Figura 2 muestra la localización de los diferentes ensambles combustibles, con la numeración de cada uno de ellos asignada por el simulador, para la simetría de un cuarto de núcleo. Los ensambles de cobija-dummy están localizados principalmente en la periferia del núcleo (color amarillo) para funcionar como reflectores y al mismo tiempo para favorecer la cría del Th-232 a U-233. Los ensambles de cobija-semilla frescos (los más reactivos de color verde) se localizan hacia la zona exterior del núcleo, previa a la periferia, para mejorar la cría de los ensambles cobija-barra ficticia y aplanar la distribución de potencia radial. El resto de los ensambles están localizados en el núcleo a fin de obtener una distribución suave de potencia así como la longitud de ciclo deseado. Cabe mencionar que este acomodo se seleccionó después de intentar muchas otras combinaciones, pero los otros diseños probados producían picos de potencia importantes. El hecho de poner los ensambles "frescos" de semilla-cobija hacia la periferia proporciona un efecto de "anillo de fuego", lo cual tiende a aplanar la distribución de potencia. Otra opción que aún no se ha explorado para mejorar el diseño de la recarga con respecto a los picos de potencia, logrando la longitud del ciclo deseada, es incorporar veneno consumible (gadolinia) en algunas barras del ensamble semilla-cobija. Esta opción se analizará en un futuro próximo y no es presentado en este trabajo.



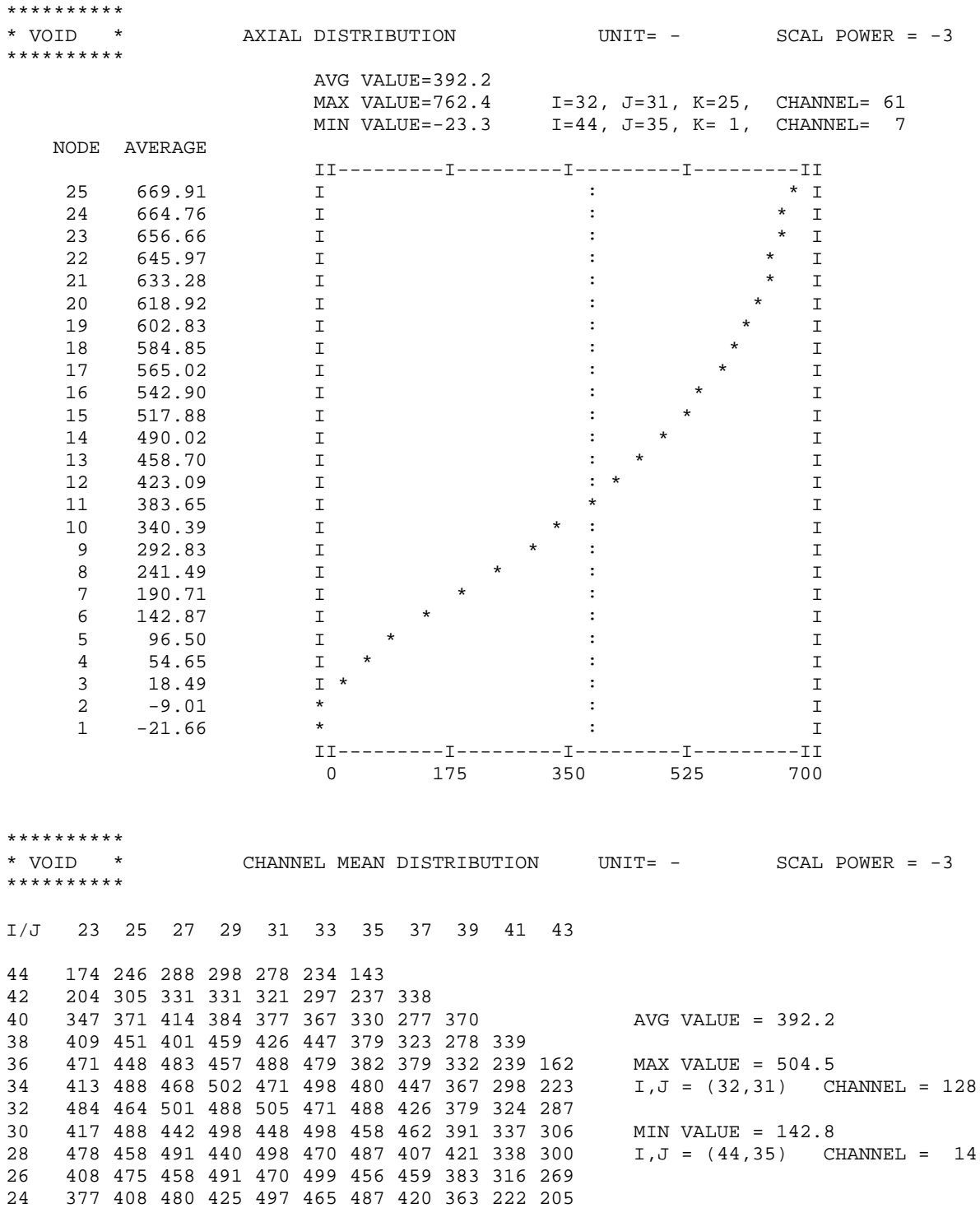
parte central del núcleo, la fracción de vacíos en esta zona es considerablemente mayor que en la periferia.



**Figura 3. Distribución de potencia relativa**



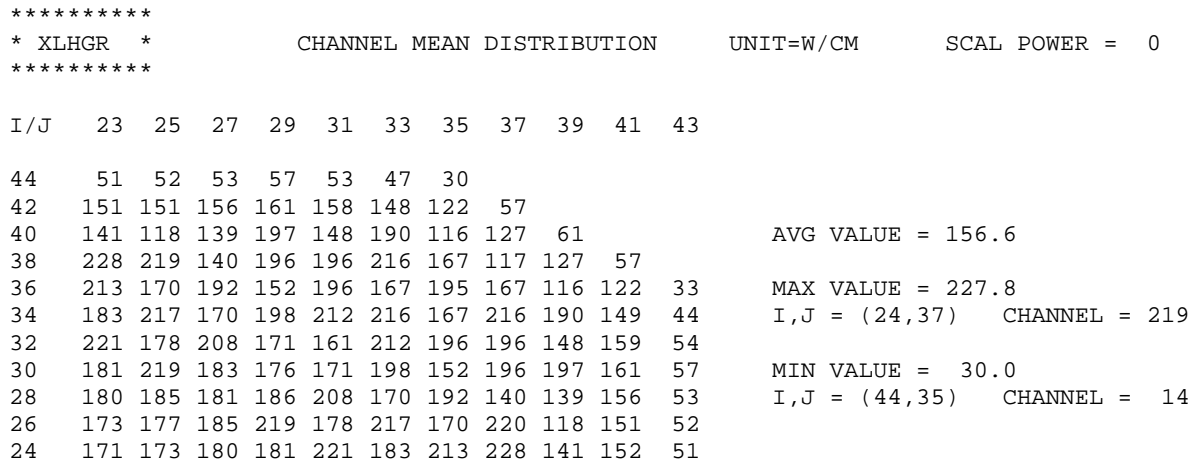
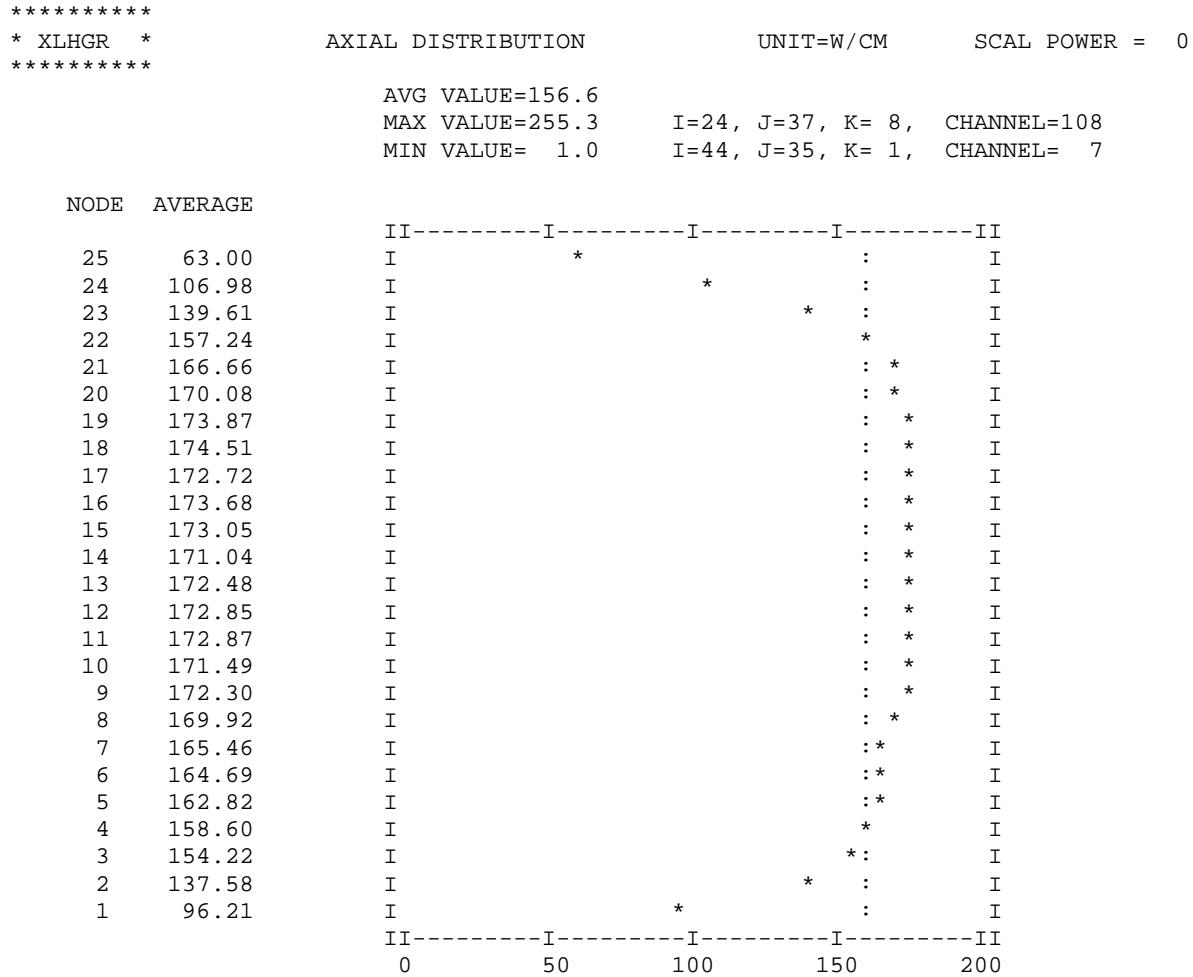
**Figura 4. Distribución de quemado**



**Figura 5. Distribución de vacíos**

En la Figura 6 se presentan las gráficas de la generación de calor lineal en el núcleo (LHGR de sus siglas en inglés). Se observa que este importante límite térmico de

seguridad presenta valores bajos, comparables a los de núcleos de BWR que utilizan combustible de uranio.



**Figura 6. Distribución de la generación de calor lineal (LHGR)**



Por lo que respecta al margen de apagado, el valor obtenido al inicio del ciclo (BOC por sus siglas en inglés) fue de 0.57%  $\Delta k/k$  con un eigenvalor de referencia (target) igual a 1.0. Tomando el valor de eigenvalor igual a 1.0023, que es el recomendado para estas condiciones en núcleos de uranio, el margen de apagado es de 0.8%  $\Delta k/k$ . En ambos casos los resultados muestran que el criterio de subcriticidad de 1%  $\Delta k/k$  no se cumple, por lo que resulta aconsejable la introducción de una zona axial superior en el ensamble de menor enriquecimiento y/o la introducción de gadolinia en varias de las barras del ensamble.

Finalmente la Tabla I muestra algunos resultados preliminares de los costos para la recarga de equilibrio propuesta, y es comparada con los costos de un núcleo equivalente de uranio estándar. En particular se comparó con la recarga del ciclo 5 de la unidad 1 de la CLV, la cual generó una energía semejante (ligeramente menor) a la producida por la recarga de equilibrio presentada en este trabajo. Los resultados muestran que el costo del combustible de torio-uranio propuesto es ligeramente mayor al del uranio estándar. Escalando linealmente el costo de la recarga de uranio estándar a que produzca exactamente la misma energía que la recarga de torio-uranio se obtiene un costo de  $\$42.15 \times 10^6$  dólares, lo cual es prácticamente el mismo el costo de la recarga de torio-uranio. Un proceso de optimización es necesario a fin de reducir el enriquecimiento del sub-ensamble de semilla. Una reducción del enriquecimiento en U-235 a 7 w/o en el sub-ensamble de semilla produce un costo de  $\$40.42 \times 10^6$  dólares, valor que está por debajo del costo del núcleo de uranio estándar.

**Tabla I. Costos de la recarga de combustible**

Diseño	Long. Ciclo MWd	Ensamblés en la recarga	Enriq. 235U w/o	Costo Uranio M\$*	Costo Torio M\$	Costo Enr. M\$	Costo Fab. M\$	Costo Post. M\$	Costo Total M\$
Th-U cobija- semilla	758,767	104	7.5	9.510	0.476	12.533	4.833	14.764	42.117
Uranio estándar	744,362	112	3.52	9.161	-----	9.705	5.544	16.934	41.345

\*M\$: Millones de dólares americanos. Costos basados en la referencia [10]:

Costo del Enriquecimiento: \$110/SWU

Costo del uranio y torio (incluye conversión): \$58/Kg

Costo de fabricación: \$275/Kg U

Costo de Post-irradiación (back-end): \$840/kg U por disposición directa

#### 4. CONCLUSIONES

La recarga de equilibrio es factible, comparable a las que se realizan en Laguna Verde, con un buen comportamiento de las variables analizadas. Se concluye que es conveniente incluir venenos quemables, tipo gadolinia, en el combustible con el fin de mejorar el diseño de la recarga y el margen de apagado.

Los costos se pueden reducir buscando la optimización de la recarga, ya sea disminuyendo el enriquecimiento del ensamble cobija-semilla o disminuyendo el número de ensambles frescos en la recarga. También hay que tomar en cuenta que en cálculo de los costos del combustible, al considerar el costo de post-irradiación (*Back-end*), el ciclo del Th-U tendría ventajas si se considera la cantidad de actínidos a procesar, puesto que produce una cantidad considerablemente menor de actínidos [11] (aproximadamente la mitad) que el ciclo de uranio.

## AGRADECIMIENTOS

Este trabajo fue realizado con el apoyo del proyecto de CONACyT No. 41592. Alejandro Núñez Carrera agradece a la Comisión Nacional de Seguridad Nuclear y Salvaguardias por las facilidades prestadas para la realización de este trabajo.

## REFERENCIAS

1. X. Zhao, M. J. Driscoll, M. S. Kazimi, P. Hejzlar, "An Innovative ThO<sub>2</sub>-UO<sub>2</sub> Fuel for LWRs", *Trans. Am. Nucl. Soc.*, Milwaukee, USA, June 17-21, 2001, **84**, 235-236 (2001).
2. T. K. Kim, T. J. Downar, "Thorium Fuel in Tight Pitch LWR Lattices", *Trans. Am. Nucl. Soc.*, Milwaukee, USA, June 17-21, 2001, **84**, 236-238 (2001).
3. E. P. Lowen, K. D. Weaver, J. K. Hohorst, "Reactivity, Isotopics, and Thermal Steady-State Analysis of Homogeneous Thoria-Urania Fuels", *Nuclear Technology*, **137**, 97-110 (2002).
4. J.L. François, A. Nuñez. "Neutronic Study of an Innovative BWR Thorium-Uranium Fuel", *International Conference on the New Frontiers of Nuclear Technology (Physor 2002)*, Seoul, Korea, October 6-10, 2002.
5. Myung-Hyun Kim, Il-Tak Woo. "Once-Through Thorium Fuel Cycle Options for the Advanced PWR Core", *ANS Reactor Physics, Mathematics and Computation and Nuclear Criticality Safety Topical Meeting (Physor 2000)*, Pittsburgh, Pennsylvania, May 7-11, 2000.
6. A. Galperin, P. Reichert, and A. Radkowsky, "Thorium Fuel Cycle for Light Water Reactor Reducing Proliferation Potential of Nuclear Power Fuel Cycle," *Science & Global Security*, **Vol. 6**, pp. 265-290 (1997).
7. Scandpower, User Manual for CM-PRESTO-91 (1992).
8. Casal, J.J., Stamm'ler., R.J.J., Villarino, E.A., Ferri, A.A.. "HELIOS: Geometric capabilities of a new fuel assembly program", *Proc. Int. Topl. Mtg. Advances in Mathematics, Computations and Reactor Physics*, Pittsburgh, Pennsylvania. **Vol. 2**, p. 10.2.1 1-13 (1991).
9. Scandpower, User Manual for TABGEN (1992).
10. OECD Nuclear Energy Agency, "The Economics of the Nuclear Fuel Cycle" (1994).
11. A. Núñez-Carrera, J.L. François, "Estudio de un Nuevo Concepto de Combustible Basado en Torio para BWR", *Memorias del XII Congreso Anual de la Sociedad Nuclear Mexicana y XX Reunión Anual de la Sociedad Mexicana de Seguridad Radiológica*, Ixtapa, Guerrero del 10 al 13 de noviembre del 2002.